



Modellering av helstamssystemets teoretiska potential i Sverige vid uttag av fler sortiment

– Kan automation påverka systemets potential?

Modelling of the whole-stem system's theoretical potential in Sweden if more assortments are extracted – Can automation affect the system's potential?

Aron Långberg

Examensarbete/Självständigt arbete • 30 hp

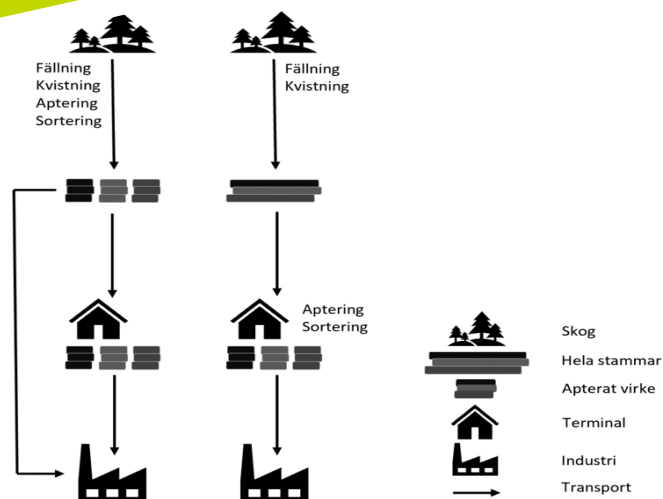
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU

Institutionen för skogens biomaterial och teknologi

Jägmästarprogrammet

Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi, 2020:13

Umeå 2020



Modellering av helstamssystemets teoretiska potential i Sverige vid uttag av fler sortiment – Kan automation påverka systemets potential?

Modelling of the whole-stem-system's theoretical potential in Sweden if more assortments are extracted – Can automation affect the system's potential?

Aron Långberg

Handledare: Ola Lindroos, Sveriges lantbruksuniversitet, Skogens biomaterial och teknologi
Examinator: Dimitris Athanassiadis, Sveriges lantbruksuniversitet, Skogens biomaterial och teknologi

Omfattning: 30 hp
Nivå och fördjupning: Avancerad nivå, A2E
Kurstitel: Mastersarbete i skogsvetenskap
Kurskod: EX0956
Program/utbildning: Jägmästarprogrammet
Kursansvarig inst.: Institutionen för skogens biomaterial och teknologi

Utgivningsort: Umeå
Utgivningsår: 2020
Omslagsbild: Aron Långberg
Serietitel: Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi
Delnummer i serien: 2020:13

Nyckelord: Kortvirkessystem, kostnad, helstamsmetod, central aptering, drivningssystem, automation, fjärrstyrning.

Sveriges lantbruksuniversitet
Institutionen för skogens biomaterial och teknologi

Sammanfattning

Skogen ska räcka till fler produkter än någonsin och nya produkter och användningsområden för skogsråvara upptäcks ständigt. Nya produkter kan leda till att skogsråvaran delas in i fler sortiment. I detta arbete modellerades ett helstamssystem och ett kortvirkessystem, från skog till industri, för att jämföra systemens teoretiska potential vid ett ökat antal sortiment i Sverige. Då det är lång tid innan ett helstamssystem är verklighet i Sverige så modellerades även fyra automationsscenario för att undersöka hur tekniska framsteg kan påverka systemens potential. Modelleringen baserades både på empiriska data och antaganden från författaren och för att visa på resultatens beroende av indatanivåer gjordes även känslighetsanalyser. Resultatet visade att vid modellens grundscenario hade helstamssystemet lägst kostnad om 18 eller fler sortiment sorteras ut och att det fanns ett nästan linjärt samband mellan kortvirkessystem totalkostnad och antalet sortiment. Helstamssystemets skördekostnad var lägst oavsett antal sortiment. Terrängtransportkostnaden för kortvirkessystemet berodde mer på hur uttagsvolymen fördelades än antalet sortiment. Terrängtransporten i helstamssystemet var känslig för långa terrängtransportavstånd och för hur stor lastvolymen var. Kostnaderna för vägtransporterna i kortvirkessystemet ökade snabbt med ökat antal sortiment, men storleken på det kostnadspåslag som modellerades är en osäker variabel. Terminalarbetet för helstamssystemet var betydligt mer kostsamt än terminalarbetet för kortvirkessystemet vilket var väntat. Automationsscenario påverkade systemen ungefär lika mycket. Detta leder till att om systemen har samma typ och nivå av automation så påverkades inte förhållandet mellan dem nämnvärt. Om ett system blir mer automatiserat än det andra ändras dock skärningspunkten för antal sortiment vid lika totalkostnad, till det mer automatiserade systemets fördel jämfört med i utgångsscenario eller vid lika automationsnivå.

Nyckelord: Kortvirkessystem, kostnad, helstamsmetod, central aptering, drivningssystem, automation, fjärrstyrning.

Abstract

The forest is supposed to provide more products than ever and new products and uses of wood are constantly discovered. New wood products can result in a desire to extract more assortments, which might be challenging within the cut-to-length system. In this study, the whole-stem- and cut-to-length-system, from the forest to the industry, were modelled to compare the systems' theoretical potential if more assortments would be sorted out in Swedish forestry. It will take a long time until a whole-stem-system would be introduced to any greater extent due to the Swedish forestry's current infrastructure. Therefore, four automation scenarios were modelled to examine how technical advancements might affect the systems' potential. The modelling was based on both empirical data and assumptions made by the author. To explore the results' dependence on the input data levels, sensitivity analysis was carried out. The results showed that at the model's base scenario, the whole-stem system had the lowest cost when 18 or more assortments were sorted out and there was an almost linear connection between the cut-to-length-system's total cost and the number of assortments. The whole-stem system harvest cost was lower regardless of the number of assortments. The terrain transport cost for the cut-to-length system depended more on how the extracted volume was distributed than the number of assortments. The terrain transport cost in the whole-stem-system was sensitive for long terrain transport distances and payload volume. The cut-to-length system's road transport cost increased fast with increased number of assortments but the cost increase that was modelled is a uncertain variable. The terminal work for the whole-stem-system had greatly higher cost than the cut-to-length-system, which was expected. The automation scenario's affected both systems similarly. If both systems have the same amount and type of automation the relationship in cost-efficiency between them did not change much. However, a system with a higher level of automation was more cost-efficient than a system with lower level of automation, resulting in a change in the number of assortments for when the costs were identical.

Keywords: Cut-to-length-system, cost, whole-stem-method, central bucking, logging system, automation, remote-operation.

Förord

Detta arbete är ett examensarbete inom jägmästarprogrammet (Master of science in forestry) som omfattar 30 hp, och har utförts vid Institutionen för skogens biomaterial och teknologi, Sveriges lantbruksuniversitet i Umeå. Arbetet är utfört inom ramen för forskningsprogrammet *Mistra Digital Forest*, för det Vinnova-finansierade projektet *Auto*², samt för det Energimyndigheten-finansierade projektet *HAFSBit* (projekt 48003-1).

Jag vill tacka min handledare Ola Lindroos som introducerade ämnet för mig och hjälpt mig under arbetets gång. Jag vill även tacka Olle Gelin på Skogforsk för hjälp och idéer, framförallt om automation.

Umeå, maj 2020

Aron Långberg

Innehållsförteckning

Ordlista/Förkortningar	9
1 Inledning	11
1.1 Ökad virkesanvändning - fler sortiment	11
1.1.1 Varför kan antalet sortiment öka i framtiden?	11
1.2 Drivningsmetod och -system	11
1.2.1 Kortvirkessystemet	12
1.2.2 Helstamssystemet	13
1.2.3 Helstamsmetoden i Sverige	13
1.2.4 Hur påverkas skogsbruket av ett ökat antal sortiment?	14
1.3 Automation	15
1.3.1 Tidigare studier	15
1.4 Problemformulering	17
1.5 Syfte	17
2 Material och metod	18
2.1 Drivningssystem	18
2.2 Modeller	19
2.2.1 Modellens ingångsvärden till grundscenariot	19
2.2.2 Sortiment	21
2.2.3 Skördare	22
2.2.4 Skotare	24
2.2.5 Lunnare	26
2.2.6 Transport	26
2.2.7 Terminal	28
2.2.8 Automation	28
2.2.9 Beståndsdata	29
2.3 Känslighetsanalys	29
3 Resultat	30
3.1 System	30
3.2 Automation	34
3.3 Känslighetsanalys	37
4 Diskussion	45
4.1 Resultat	45
4.2 Styrkor och svagheter	48

4.3	Framtida studier	49
4.4	Slutsats	50
	Referenslista	51
	Bilaga 1	54

Ordlista/Förkortningar

Term/Förkortning	Förklaring
Drivning	Processen där skog avverkas och virket transporteras från skogen till väg.
Drivningsmetod	I vilken form träden avverkas och transporteras.
Drivningssystem	Vilken utrustning som används för att utföra en drivningssmetod.
Helstamsmetod	Träden kapas och kvistas i skogen och de hela stammarna transporteras till väg/terminal/industri där de apteras.
Helstamssystem	Maskiner och utrustning för att avverka och transportera virke enligt helstamsmetoden.
HSS	Helstamssystemet
Kortvirkesmetod	Träden kapas, kvistas och apteras till sortiment i skogen och transporteras sedan till bilväg.
Kortvirkessystem	Maskiner och utrustning för att avverka och transportera virke enligt kortvirkesmetoden.
KVS	Kortvirkessystemet
Skörd	Avverkning av träd, kvistning och eventuell aptering.
Skördkostnad	Kostnad för momentet skörd.
Terminalarbete	Moment för arbetet på virkesterminal.
Terminalkostnad	Kostnad för momentet terminalarbete.
Terrängtransport	Transport av träd från skogen till avlägg vid bilväg.
Terrängtransportkostnad	Kostnad för momentet terrängtransport.
Totalkostnad	Ett drivningssystems sammanlagda kostnad för samtliga ingående moment.
Vägtransport	Transport av virke från avlägg till terminal eller industri
Vägtransportkostnad	Kostnad för momentet vägtransport.

1 Inledning

1.1 Ökad virkesanvändning - fler sortiment

1.1.1 Varför kan antalet sortiment öka i framtiden?

I EU:s strategi mot att bli en bioekonomi är skogen en viktig pusselbit. Skogen ska räcka till att uppnå flera mål som att bevara arter och deras habitat, bevara vattenkvalité för en hållbar vattenförsörjning, kolinlagring och öka antalet biobaserade produkter (European Commission, 2018). Målen att bevara biodiversitet och vattenkvalité görs främst genom att skydda vissa skogar från avverkning. Dessa mål står därför i konflikt med målet att öka antalet biobaserade produkter genom att arealen som aktivt skogsbruk utförs på minskar. Däremot kan nyttjandet av den skogen som brukas öka. Virkesutnyttjandet kan öka genom att mer av skogsråvaran och restprodukter från de befintliga processerna används för att tillverka nya produkter (Backlund & Nordström, 2014). Tillverkningen av produkter från skogsråvara sker i ett divergerande flöde. Med det menas att råvaran (träden) delas upp i sortiment utifrån användningsområde (dvs. önskade produkter). Exempel på två vanligt förekommande (övergripande) sortimentindelningar är massaved och timmer, där olika trädslag hålls isär eller blandas för specifika massaveds- eller timmersortiment. Varje bestånd som avverkas resulterar alltså i ett antal sortiment, som skall skickas till olika industrier. Ett sätt att öka virkesutnyttjandet är genom att än bättre matcha träråvaran mot de produkter som ska tillverkas. Träråvara är heterogen och vissa träd kan ha fysiska eller kemiska egenskaper som passar bättre till vissa produkter eller processer. Genom att dela upp träden i fler sortiment kan träråvaran skräddarsys mot de slutprodukter som ska tillverkas.

1.2 Drivningsmetod och -system

Processen där skog avverkas och virket transporteras från skogen till väg, kallas för drivning. Beroende på vilken drivningsmetod som används så transporteras träden i olika mängd och form (Lindroos et al. 2017). Drivningsmetoder kan variera

från att hela trädet inklusive kvistar och rötter transporteras till industri till att stammen apteras ute i skogen och olika delar av stammen transporteras till olika industrier medan kvistar, stubben och rötter blir kvar i skogen. De vanligaste drivningsmetoderna är:

- *Helträdmotoden* där träden kapas vid roten och transporteras hela och okvistade, men ibland med avkapad topp.
- *Helstamsmetoden* där träden kapas vid roten, kvistas och toppkapas. De kvistade stammarna transporteras sedan hela.
- *Kortvirkesmetoden* där trädet fälls, kvistas och apteras till stockar (sortiment) innan någon transport sker.

I detta arbete ingår helstamsmetoden och kortvirkesmetoden. Helstamsmetoden är vanlig i Nordamerika, Nya Zealand och vissa europeiska länder som Tyskland och Danmark (Nylinder & Fryk, 2011). Kortvirkesmetoden är vanligast i de nordiska länderna, Ryssland och de baltiska länderna. Globalt så sker 52% av det maskinella avverkningsarbetet enligt helstamsmetoden och 48% enligt CTL-metoden sett till avverkad volym (Lundbäck et al. 2018). Kortvirkesmetodens stora fördel är att de kortare längderna förenklar transport och hantering av virket (Esping, 2014) medan helstamsmetodens stora nackdel är svårare hantering och transport (Larsson & Nilsson, 1977; Granqvist, 1977, Karlsson et al. 1988). Den största fördelen med helstamsmetoden är ökad flexibilitet gentemot industrins efterfrågan eftersom apteringen sker i ett senare skede än i CTL-metoden (Nylinder & Fryk, 2011).

Varje drivningsmetod kan utföras på flera olika sätt beroende på vilken utrustning som används. Helstamsmetoden kan tillämpas med manuellhuggning med motorsåg och transport med traktor eller fällning med fällare-läggare, transport med lunnar till väg där stammen kvistas med en kvistningsmaskin innan transport till industri. Varje kombination av arbetssätt som används för att utföra en drivningsmetod kallas för ett drivningssystem och beskrivs ofta med de ingående verktygen eller maskinerna som används.

1.2.1 Kortvirkessystemet

Vid tillämpning av helmekaniserad drivning enligt kortvirkesmetoden så används oftast ett drivningssystem baserat på två maskiner (Häggström et al. 2013). En skördare som fäller, kvistar och apterar träden till stockar och en skotare som sedan lastar och kör ut virket till väg. En fördel med detta system är att virket inte släpas på marken vilket minskar mängden grus och smuts som fastnar i barken på virket. Kortvirkessystemet med en skördare och skotare är det absolut vanligaste drivningssystemet i Sverige. Maskinerna som används är bland de mest tekniskt avancerade i världen (Lindroos et al. 2019). Det beror på att kortvirkessystemet i sig kräver mer teknik eftersom stammarna ska apteras och lastas i lastutrymmen redan i skogen. De nordiska länderna Sverige och Finland har dessutom höga personalkostnader jämfört med många andra länder, vilket ställer höga krav på maskinernas produktivitet.

1.2.2 Helstamssystemet

I länder som använder helstamsmetoden är det vanligaste maskinsystemet fällare-läggare som avverkar och lägger träden i högar varefter en lunnare greppar en hög med träd i rotändan och drar ut träden till väg. Eftersom stockarna släpas så blir de smutsigare än vid CTL-metoden. Produktionen i tex sågverken kan snabbt ställas om till förändringar i efterfrågan eftersom apteringen sker strax före sågningen, och är därför mindre beroende av tillförlitliga efterfrågeprognoser. Om apteringen sker vid en terminal eller industri i stället för i skogen kan dessutom olika röntgentekniker användas för att optimera apteringen med hänsyn till virkets inre egenskaper, vilket inte är möjligt med skördaraggregatet. Värdeutbytet kan öka med 9% om virket apteras optimalt med hjälp av en datortomograf (så kallad CT-skanner) jämfört med vanlig skördaraptering (Nordmark, 2005). Om virket även sorteras med hjälp av en datortomograf ökar värdeutbytet med 13% jämfört mot skördaraptering och sortering i diameterklasser. Idag finns det ingen röntgenteknik som är tillräckligt liten och robust för att montera på skördaraggregat vilket gör att röntgenteknik endast kan nyttjas i helstamsmetoden för att aptera virket.

1.2.3 Helstamsmetoden i Sverige

Idag används i princip bara korvirkesmetoden i Sverige (Nordfjell et al. 2010) men helstamsmetoden har förekommit, om än i mindre utsträckning. 1969 avverkades 15 % av den avverkade volymen i Sverige enligt helstamsmetoden (Larsson & Nilsson, 1977). 1990 fanns sex sågverk i Sverige som sågade hela stammar men de har alla försvunnit, förmodligen till följd av att de ensamma fick försöka finansiera och utveckla system för att hantera hela stammar (Nylinder & Fryk, 2011). Enligt Granqvist (1997) hade helstamssystemet som användes i Sverige ca 34 kr per fast kubikmeter virke på bark (kr/m³fpb) bättre betalningsförmåga än kortvirkessystemet i mitten på 1990-talet, till följd av bättre aptering, bättre virkesutnyttjande, mindre blånadskador och mindre dubbskador. Det var mindre skador på virket eftersom träden fälldes och kvistades motormanuellt i helstamssystemet medan kortvirkessystemet bestod av skördare och skotare. Ett modernt mekaniserat helstamssystem skulle förmodligen ha samma mängd dubbskador och blånad som kortvirkessystemet. Lövgren och Warpman (1992) gjorde en teoretisk jämförelse mellan ett helstamssystem och ett kortvirkessystem för ett tyskt sågverk där nettot för helstamssystemet var 5,1 % högre än korvirkessystemet, trots att kostnaderna var högre. I slutet av 1960-talet var helstamssystemets vägtransporter i Sverige den del av systemet som hade högst kostnader jämfört mot kortvirkessystemet (Larsson och Nilsson, 1977). Det berodde dels på att alla stammar lastades med rotändan åt samma håll, vilket minskade volymen som rymdes på lastbilen. Det berodde även på att lastbilarna som transporterade hela stammar inte kunde köra på vägar med för snäva kurvor, vilket begränsade det tillgängliga vägsystemet för helstamssystemet jämfört mot kortvirkessystemet. Detta lede till att transportavstånden ofta blev längre för transporter av hela stammar än för kortvirkessystemet.

Karlsson et al, (1988) menar att massaveden i helstamssystemet får ett lägre netto än massaved i kortvirkessystemet. Detta beror på att massaveden alltid körs via ett sågverk, eftersom stammar ofta innehåller både timmer och massaved, vilket ledde till högre kostnader. Till skillnad mot timret skapades det heller inget mervärde för massaveden tack vare bättre aptering. Idag skulle ett helstamssystem även kunna skapa mervärde för andra sortiment än timmer ifall röntgenteknik används i samband med apteringen.

I Sverige har vi använt kortvirkemetoden under en lång tid och samlat mycket kunskap och erfarenhet av hur det tillämpas. Dessutom är hela systemet, från avverkningen i skogen till industrierna, uppbyggt för att hantera kortare längder. Det är faktiskt så dominerande, att andra drivningsmetoder ofta inte övervägs som alternativ. Hallonborg (1999) ansåg att helstam- och helträdssystem inte var rimliga att använda i Sverige eftersom det inte är det dominerande systemet och att vägsystemet inte är dimensionerat överallt för att transporter ska vara möjliga. Hallonborg har rätt i att implementera ett helstamssystem idag i Sverige skulle vara mycket svårt eftersom infrastrukturen i skogsbruket inte är utformat för det. På en längre tidshorisont är det dock fullt möjligt att implementera ett helstamssystem. Tack vare ny teknik och automation kanske helstamsmetoden kan vara lönsam i Sverige igen.

1.2.4 Hur påverkas skogsbruket av ett ökat antal sortiment?

För att matcha träråvara mot slutprodukter skulle den behöva sorteras i fler sortiment än vad det görs idag. I Sverige sorteras i dagsläget virket i skogen främst baserat på träslag, samt i flera olika sågsortiment, massaved och energived. Totalt sorteras virket i åtta "normalsortiment", nämligen normaltimmer av tall respektive gran, klenntimmer av tall respektive gran, massavedsortimenten barr, gran och löv, samt energived. Därutöver tillkommer eventuella specialsortiment. För att öka virkesutnyttjandet skulle ytterligare sortiment kunna tillkomma i framtiden som är riktade till ny kemikalieproduktion, nya typer av pappersprodukter, samt för olika drivmedel. Om fler sortiment sorteras ut i skogen påverkar det alla delar av försörjningskedjan i kortvirkessystemet som används idag.

I en slutavverkning minskar skördarens produktivitet med ca 1% och skotarens produktivitet minskar med 3–4% för varje nytt sortiment som sorteras ut i skogen (Brunberg & Arlinger, 2001). Skördaren förlorar produktivitet eftersom det blir fler kranrörelser och det tar mer tid att sortera virket i fler högar. Skotningsarbetet blir svårare och flera av skotarens arbetsmoment påverkas av ökat antal sortiment. Volymen för de enskilda sortimenten minskar för varje extra sortiment som totalvolymen delas upp i, och det blir svårare att köra fulla sortimentsrena lass. Skotningsarbetet tar längre tid desto fler sortiment som ska med i samma lass (Manner et al. 2013). Det är arbetsmomenten lastning, körning under avlastning och avlastning som påverkas av antalet sortiment i lasset. Manner et al. (2013) kom fram till att det är effektivast att köra ett sortiment per lass så länge det går att lasta fullt. När volymen är för liten av ett sortiment är det bättre att lasta fler sortiment i

samma lass. Den lägre volymen av varje sortiment leder till att volymen per sortiment längs körvägarna minskar och skotaren måste köra längre innan det blir ett fullt lass. Manner et al. (2013) kom således fram till att lastningsarbetet främst påverkas av virkeskoncentrationen (dvs den totala volymen) av de sortiment som lastas, och inte antalet sortiment som lastas.

Även lastbilstransporterna påverkas om en given volym delas upp i ett större antal sortiment. Transportavstånden ökar med fler sortiment eftersom mindre volymer per sortiment innebär att flera avlägg måste besökas för att fylla lastutrymmet med sortiment som skall till en viss industri. I en studie av Carlgren et al. (2006) undersöktes effekten av att två massabruk efterfrågade en specifik mix av massaved från gallring respektive slutavverkning, det vill säga efterfrågan på två sortiment istället för ett. Transportkostnaderna ökade då med 6,1 %. Inom skogstransporter används ofta returtransporter vilket innebär att istället för att köra ett lass till en industri och sedan köra med tom lastbil tillbaka så planeras en transport med ett sortiment som finns nära den industri där lastbilen lastat av som ska transporteras till en annan industri som ligger i den riktning som lastbilen ändå ska köra. Detta gör i ruttplaneringen och blir en typ av kostnadsbesparing eftersom mängden tomkörning minskar. Carlgren et al. (2006) minskade kostnadsökningen något till 4,6 % dyrare än med ett gemensamt massavedssortiment genom att planera körningen och öka mängden returtransporter.

1.3 Automation

Sedan slutet av 1800-talet har gallring och föryngringsavverkning gått från att utföras helt manuellt till att vara fullt mekaniserade (Silversides, 1997). Det som drivit utvecklingen är brist på arbetskraft, vilja att öka antalet arbetstimmar per person, möjligheten att jobba alla årstider, minska kostnader, minska risken och andelen tungt arbete för skogsarbetarna. Plantering utförs dock fortfarande helt manuellt och röjning motormanuellt. Nästa steg i mekaniseringen av skogsmaskiner är semiautonoma system, fjärrstyrning och fullt autonoma system. Utvecklingen av dessa maskiner pågår för fullt men det är fortfarande långt kvar innan helt autonoma maskiner är verklighet i skogsbruket (Lindroos et al. 2019).

1.3.1 Tidigare studier

Vilka fördelar finns det då med autonoma maskinsystem? Enligt Hellström et al. (2009) så finns det flera potentiella fördelar. En skogsmaskin har i snitt en produktivitet på 20 m³/h och arbetar ca 3000 timmar per år med två förare som går i skift. Ett år är totalt 8760 timmar så om en autonom maskin skulle ha en effektiv arbetstid på 6000 timmar så skulle det räcka med halva produktiviteten på maskinen för att producera samma årsvolym. En annan fördel för autonoma maskinsystem är att idag är föraren maskinernas flaskhals. De ska fatta ett stort antal beslut när de styr både kran och maskinen och tar hänsyn till omgivningen. Om en del av arbetet

skulle ske automatiskt skulle föraren ha mindre stress och kunna fokusera till exempel enbart på att styra kranen. Ett helt autonomt system skulle med tiden lära sig med hjälp av artificiell intelligens och på sikt ha högre produktivitet än en mänsklig förare. Idag består förarlönerna för ca 30–40% av timkostnaden för maskinen, men skulle näst intill försvinna med en förarlös maskin, eller minska om en förare kan styra flera maskiner samtidigt. En annan fördel som Hellström et al. (2009) identifierade var att om de autonoma maskinerna kan jobba ca 6000 timmar per år och på så vis halvera kravet på produktiviteten så skulle mindre och enklare maskiner kunna användas vilket kan leda till mindre slitage på maskinen och mindre markskador i och med att maskinen är lättare. Enbart genom att ta bort hytten skulle maskinvikten kunna reduceras med 1–3 ton och utan hytt skulle maskinerna kunna göras mer balanserade för att minska på marktrycket. Det skulle leda till minskad tillverkningskostnad och bränsleförbrukning.

Ringdahl et al. (2012) och Lindroos (2012) undersökte potentialen med direktlastning jämfört med det konventionella tvåmaskinsystemet med skördare och skotare. Det mest konkurrenskraftiga alternativet mot skördaren och skotaren var en drivare med förare som avverkar och lastar sig själv och en autonom skotare som byter lastutrymme med drivaren och sedan kör ut till väg där skotaren avlastar sig själv. Detta system bedömdes ha bra potential då drivarens möjlighet att lasta sig själv medan skotaren var borta fungerade som en buffert och minskade väntetider. Besparingen i detta system berodde på minskade personalkostnader och eliminering av lastningstiden för skotaren. Samma system analyserades av Hallonborg, (2003) men i den studien var systemet aldrig lönsamt.

Ett annat system som undersöktes var att en vanlig skördare direktlastade en eller flera autonoma skotare. Detta system hade inte samma potential som drivaren med en autonom skotare eller det konventionella tvåmaskinsystemet eftersom kostnaden för fler maskiner och väntetiderna i slutändan blev dyrare än vad direktlastningen besparade (Ringdahl et al. 2012; Lindroos 2012). I en tidigare utförd studie (av samma maskinsystem fann författarna att systemet var lönsamt i grov skog nära väg (Hallonborg, 2003), men de senare studierna hade fler variabler med i sina modeller vilket kan förklara varför resultaten skiljer sig åt.

Det har även prövats med att en eller två skotare fjärrstyr en skördare (Besten-systemet). Detta system har getts olika potentialer i olika studier. Hallonborg (2003) fann att systemet med en skotare alltid var dyrare än tvåmaskinsystemet och när två skotare används så kan det vara lönsamt i grova bestånd med medellånga terrängavstånd. Enligt Bergqvist (2008) så var samma system konkurrenskraftigt på 33 % av Sveriges areal. I en senare studie av Lindroos (2012) så var det endast 2 % av Sveriges areal där maskinsystemet kunde konkurrera med tvåmaskinsystemet. Ringdahl et al. (2012) byggde vidare på Lindroos (2012) statiska modell och gjorde den mer dynamisk och då blev resultatet att systemet var konkurrenskraftigt på mindre än 1 % av Sveriges areal. Både Lindroos (2012) och Ringdahl et al. (2012) använde mer avancerade modeller än Bergqvist (2008) vilket gör att de re-

sultatens förmodligen är närmare sanningen. Det kan också nämnas att Bestensystemet testades i praktisk drift av skogsbolag och var redo för serieproduktion, men slog inte igenom.

1.4 Problemformulering

I framtiden är det troligt att det kommer göras fler produkter av skogsråvaran. Det kommer i sin tur innebära att råvaran kommer att behöva fördelas på fler sortiment än i dag. Om sortimenten apteras upp i skogen enligt kortvirkessystemet, innebär sortimentsökningen merarbete i hela drivningsskedjan, från skog till industri, vilket leder till ökade kostnader. Helstamssystemet är däremot mindre känsligt för antalet sortiment, eftersom det extra arbetet och kostnaden endast uppstår efter apteringen vid terminal eller industri. Däremot är helstamsmetoden dyrare än sortimentsmetoden vid få sortiment och långa transportavstånd mellan industrierna. Så frågan är om framtidens ökade antal sortiment kan göra helstamsmetoden lönsammare än kortvirkessystemet. Tidsmässigt kommer det antagligen att dröja länge innan det blir någon större ökning nya efterfrågade sortiment, eftersom många framtidsprodukter ännu är i forskningsstadiet och inte kan tillverkas tillräckligt kostnadseffektivt. Men eftersom det är en omfattande process att byta system så är det relevant att redan i ett tidigt skede göra en utvärdering av drivningssystemen. Ett byte kräver att infrastruktur som vägar, terminaler och industrier behöver byggas om och nya maskiner införskaffas, om helstamssystemet ska kunna användas i Sverige. Så när detta scenario eventuellt är verklighet är det sannolikt att maskiner inom skogsbruket automatiserats, åtminstone delvis. Därför är det relevant att i utvärderingen också undersöka vilken inverkan förväntad maskinautomation har på konkurrensförhållandet mellan kortvirkessystemet och helstamssystemet.

1.5 Syfte

Syftet med arbetet var att utvärdera hur antalet sortiment respektive automationsnivå påverkar potentialen för ett helstamssystem med aptering och sortering vid terminal, jämfört med dagens kortvirkessystem. Utvärderingen gjordes i form av teoretiska analyser, genom modellering av systemen för att jämföra deras kostnad per volym som levereras till industri.

Analyserna gjordes på principiell nivå, i form av att anta att tekniken kommer att ha en viss antagen funktionalitet och kostnad. Det togs alltså inte hänsyn till hur tekniska lösningar kommer kunna se ut eller behöver fungera. Beståndsvariablerna och maskinernas produktivitet är modellerade för slutavverkning och inte för gallring.

2 Material och metod

2.1 Drivningssystem

Först kartlades de system som modellerades i arbetet genom litteraturstudier och mindre intervjuer. System var ett kortvirkessystem och ett helstamssystem (Fig 1), vars komponenter beskrivs nedan: Båda systemen delas upp i fyra moment, skörd, terrängtransport, vägtransport och terminalhantering. Resultaten redovisas för dessa moment samt en totalkostnad för respektive system. I redovisningen av automatiseringsresultaten redovisas även en drivningskostnad, vilket är summan av skörd- och terrängtransportkostnaden för respektive system.

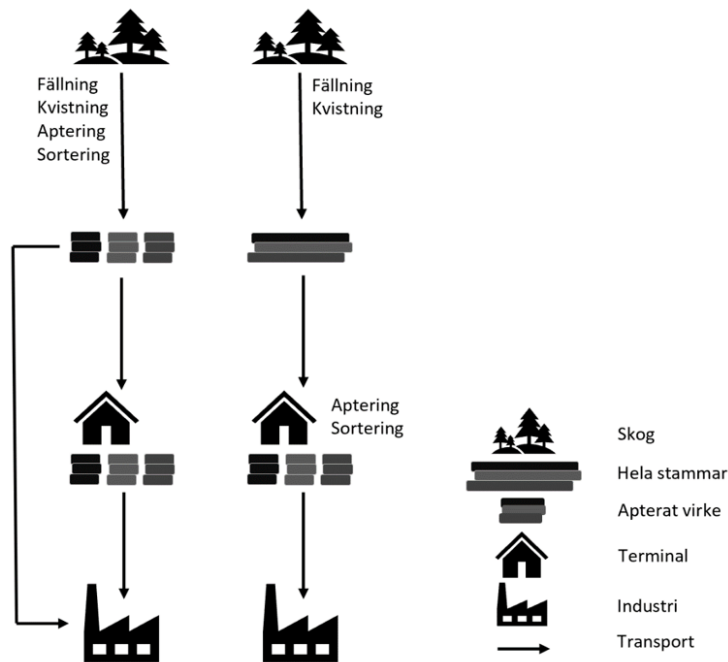
System 1 (Kortvirkessystemet):

- Skörd = En skördare med förare som fäller, kvistar och upparbetar träd till stockar i olika sortiment.
- Terrängtransport = En skotare med förare lastar stockarna i skogen och kör sedan till väg där de lastas av och läggs i virkesvältor sortimentsvis.
- Vägtransport = En timmerbil med förare lastar stockarna och kör in det till industri eller till terminal sortimentsvis. Timmerbilen blir avlastad vid industrin eller terminalen.
- Terminalhantering = Hanteringen på terminal modellerades inte mer än genom att en terminalkostnad lades på för det virket som transporteras via en terminal, innan det kördes till industri.

System 2 (Helstamssystemet):

- Skörd = En vanlig skördare med förare som fäller och kvistar träden men de apteras inte i skogen.
- Terrängtransport = En lunnare med förare drar ut stammarna till väg. Inga vältor byggs upp vid vägen.

- Vägtransport = En timmerbil med förare lastar stammarna och kör in dem till en terminal. Timmerbilen blir avlastad vid terminalen. Efter terminalhanteringen (se nedan) lastas och transporteras de apterade sortimenten från terminalen till industri där lastbilen blir avlastad.
- Terminalhantering = På terminalen apteras träden med hjälp av röntgentechnik. De färdigapterade stockarna sorteras automatiskt i sortimentvisa fack med hjälp av data från röntgen.



Figur 1. Schematisk beskrivning av struktur och virkesflöde för kortvirkesystemet (vänster) och helstamssystemet (höger).

Figure 1. Schematic representation of structure and wood-flow for the cut-to-length system (left) and the whole-stem system (right).

2.2 Modellering

2.2.1 Modellens ingångsvärden till grundscenariot

De många ingångsvariabler som finns med i modellen listas i tabell 1. I formlerna som använts finns alltid beteckningen med men värdet redovisas inte alltid i texten utan i tabell 1.

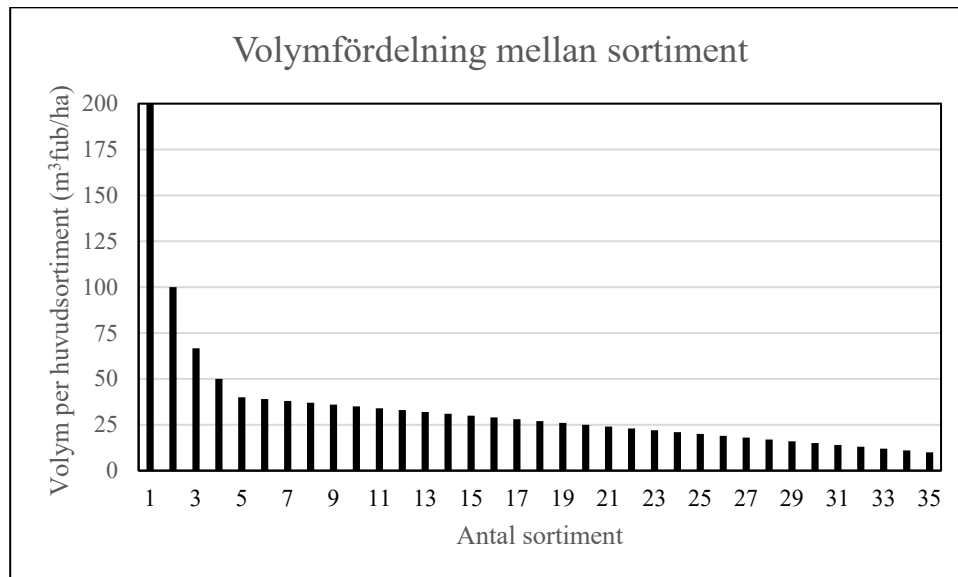
Tabell 1. *Ingångsvariablernas beteckningar och värde samt källa för värdet.*
 Table 1. *Entry variables value and their source.*

Variabel	Beteckning	Värde	Källa
Skörd			
Medelstamsvolym	x	0,35 m ³ fbp	Författarens antagande
Produktivitetsänkning per sortiment (kortvirkessystemet)		1 %	Brunberg & Arlinger (2001)
Skördare tid körning	t _{1skördare}	0,077 min/stam	Nurminen (2006)
Skördare tid positionering	t _{2skördare}	0,1 min/stam	Nurminen (2006)
Skördare tid kran tillbaka	t _{5skördare}	0,048 min/stam	Nurminen (2006)
Skördare tid ”röja”	t _{6skördare}	0,022 min/stam	Nurminen (2006)
Skördare tid arrangera	t _{7skördare}	0,012 min/stam	Nurminen (2006)
Teknisk utnyttjandegrad skördare	TU _{skördare}	80 %	Ringdahl et al. (2013)
Timkostnad skördare	KT _{skörd}	1050 kr/G ₀ tim	Ringdahl et al. (2013)
Omvandlingstal m ³ fbp - m ³ fub	c ₁	0,88 m ³ fub/m ³ fbp	Skogsverige (2019)
Terrängtransport			
Volym/ha	V	200 m ³ fub/ha	Författarens antagande
Medelterrängtransportavstånd	m _{ta}	400 m	Författarens antagande
Terrängtransport - Skotare			
Lastvolym skotare	L	18 m ³ pb	Författarens antagande
Produktivitetssänkning per sortiment (kortvirkessystemet)		3 %	Brunberg & Arlinger (2001)
Medelhastighet skotare	a	27 m/min	Nurminen (2006)
Skotare tid sort + ordning	u ₂	0,0375 min/m ³ fbp	Nurminen (2006)
Körstråkslängd	s	769 m	Nurminen (2006)
Tekniks utnyttjandegrad skotare	TU _{skotare}	90 %	Ringdahl et al. (2013)
Timkostnad skotare	KT _{skotare}	777 kr/G ₀ tim	Ringdahl et al. (2013)
Terrängtransport - Lunnare			
Gripvolym lunnare	V _{grip}	3 m ³ fub	Författarens antagande
Tekniks utnyttjandegrad lunnare	TU _{lunnare}	70 %	Hiesl (2013)
Timkostnad Lunnare	KT _{lunnare}	865 kr/G ₀ tim	Hiesl (2013)
Vägtransport			
Fast tidskostnad Skog – industri	K _{tid1}	391 kr/tim	Gille kalkyl (2013)
Fast tidskostnad Skog – terminal	K _{tid2}	320 kr/tim	Gille kalkyl (2013)
Fast tidskostnad terminal – industri	K _{tid3}	284 kr/tim	Gille kalkyl (2013)
Tid vid skogsavlägg kortvirkessystem	t _s	30 min	Författarens antagande
Tid vid skogsavlägg helstamssystem	t _s	45 min	Författarens antagande
Tid vid terminal Kortvirkessystem	t _t	15 min	Författarens antagande
Tid vid terminal helstamssystem	t _t	22,5 min	Författarens antagande
Transportavstånd Skog – industri	a _{vs1}	95 km	Davidsson & Asmoarp (2019)
Transportavstånd Skog – terminal	a _{vs2}	67 km	Davidsson & Asmoarp (2019)

Variabel	Beteckning	Värde	Källa
Transportavstånd Terminal – industri	a_{vs3}	54 km	Davidsson & Asmoarp (2019)
Sträckkostnad Skog – industri	$K_{sträck1}$	8,75 kr/km	Gille kalkyl (2013)
Sträckkostnad Skog – terminal	$K_{sträck2}$	9,26 kr/km	Gille kalkyl (2013)
Sträckkostnad Terminal – industri	$K_{sträck3}$	9,65 kr/km	Gille kalkyl (2013)
Lastvikt lastbil	l	40,9 ton	Gille kalkyl (2013)
Omvandlingstal	c_2	0,93 m ³ fub/ton	Författarens antagande
Kostnadsökning per sortiment (kortvir-kessystemet)		4,6 %	Carlgren et al. (2006)
Terminalhantering			
kubiskostnad för terminal kortvir-kessystem	k_k	30 kr/m ³ fub	Författarens antagande
Volymökning till terminal per sortiment (kortvirkesystemet)		2 %	Författarens antagande
Terminalkostnad helstamssystem	k_h	60 kr/m ³ fub	Författarens antagande

2.2.2 Sortiment

I analysen antogs det att uttagsvolymen var 200 fastkubikmeter virke under bark (m³fub) per hektar. Dessa 200 kubikmeter delades sedan upp i huvudsortiment och småsortiment. De fem första sortimenten som volymen delades upp i var huvudsortiment, tänkta att spegla de sortiment som vi använder idag. De fem huvudsortimenten antogs ha lika stor volym så vid fem sortiment så var de på 40 m³fub vardera. Småsortiment motsvarar de framtida sortimenten, och lades till utöver huvudsortimenten. I grundscenariot antogs varje framtida sortiment var 5 kubikmeter av de 200 m³fub/ha som fanns tillgängliga. Volymen för de små sortimenten drogs jämt från alla huvudsortiment vilket gav en linjär avtagning med 1 m³fub från varje huvudsortiment för varje småsortiment som lades till (Fig 2).



Figur 2. Huvudsortimentens volym per hektar beroende av antalet sortiment som de totalt 200 m³fub per ha fördelades på. Efter de fem huvudsortimenten tilldelas varje tillkommande sortiment 5 m³fub av totalvolymen.

Figure 2. The first main assortment's volume per hectare depending on the number of assortments being sorted.

2.2.3 Skördare

Produktiviteten för skördaren baserades på Nurminen (2006) och beräknades enligt ekvation 1–4. Skördaren användes både i kortvirkesmetoden och helstamsmetoden. I helstamsmetoden modifierades ekvation 4 genom att minska tiden med 50 % då stammen ej apteras. För varje extra sortiment i kortvirkessystemet minskar skördarens produktivitet med 1% (dvs 0,99P_{skörd} vid 2 sortiment) grundat på Brunberg & Arlinger (2001).

$$P_{skörd} = (60x / T_{tot_{skörd}}) \times (1 - ((\alpha - 1) / 100)) \quad (m^3 fpb / G_0 tim) [1]$$

Där:

$P_{skörd}$ är produktiviteten per effektiv arbetstimme. $(m^3 fpb / G_0 tim)$

x är medelstamsvolym. $(m^3 fpb)$

$T_{tot_{skörd}}$ är total arbetstid. $(min / stam)$

α är antalet sortiment. (n)

$$T_{tot_{skördare}} = t_{1skördare} + t_{2skördare} + t_{3skördare} + t_{4skördare} + t_{5skördare} + t_{6skördare} + t_{7skördare} \quad (min / stam) [2]$$

Där:

$t_{1\text{skördare}}$	är tid för körning.	(min/stam)
$t_{2\text{skördare}}$	är tid att positionera skördaren innan fällning.	(min/stam)
$t_{3\text{skördare}}$	är tid att fälla trädet.	(min/stam)
$t_{4\text{skördare}}$	är tid att kvista och aptera trädet.	(min/stam)
$t_{5\text{skördare}}$	är tid att föra tillbaka kranen.	(min/stam)
$t_{6\text{skördare}}$	är tid att "röja" för att komma åt träd.	(min/stam)
$t_{7\text{skördare}}$	är tid att arrangera och flyta stockar, ris.	(min/stam)

Tidsåtgången för fällningen av träd beräknades enligt ekvation 3.

$$t_{3\text{skördare}} = 0,068 + 0,142x \quad (\text{min/stam}) \quad [3]$$

Tidsåtgången för kvistning och aptering beräknades enligt ekvation 4 där tidsåtgången är beroende av medelstamsvolymen x . Nurminen (2006) menar att produktiviteten skiljer sig väldigt lite mellan gran och tall då medelstamsvolymen är mellan 0,2 och 0,9 m³fpb, och därför valdes ekvation 4, som är för gran, då den har lägre medelfel än den för tall. För helstamssystemet antogs detta moment ta hälften så lång tid då stammarna inte apteras.

$$t_{4\text{skördare}} = 0,071 + 0,616x - 0,180x^2 \quad (\text{min/stam}) \quad [4]$$

Timkostnader för skördaren (Tabell 2) baserades på Ringdahl et al. (2013), som antagit på 2600 planerade maskinarbetsstimmar per år och en teknisk utnyttjandegrad på 80%. I denna modell användes samma nivå av teknisk utnyttjandegrad. Eftersom Nurminens formler ger produktiviteten i m³fpb/G₀tim så användes ett omräkningstal för att få produktiviteten i fast kubikmeter virke under bark (m³fub) per G₀-timme, eftersom drivningskostnader vanligtvis redovisas i kr/m³fub i Sverige. Omräkningstalet som nyttjades var 0,88 m³fub/m³fpb (Skogssverige, 2016). Kostnaden beräknades enligt ekvation 5.

$$K_{\text{skörd}} = (KT_{\text{skörd}} / (P_{\text{skörd}} \times TU_{\text{skörd}})) / c_1 \quad (\text{kr/m}^3\text{fub}) \quad [5]$$

Där:

$K_{\text{skörd}}$	är kostnaden för skördarens arbete.	(kr/m ³ fub)
$KT_{\text{skörd}}$	är skördarens timkostnad.	(kr/tim)
$P_{\text{skörd}}$	är skördarens produktivitet.	(m ³ fpb/G ₀ tim)
$TU_{\text{skörd}}$	är skördaren tekniska utnyttjandegrad.	(%)
c_1	är omvandlingstal mellan m ³ fpb och m ³ fub.	(m ³ fub/m ³ fpb)

Tabell 2. Timkostnader (kr/Götim) för maskinerna i både kortvirkessystemet och helstamssystemet.
Table 2. Hourly costs for the machines in both the cut-to-length system and the whole-stem system.

Kostnadskategori	Skördare	Skotare	Lunnare
Maskinkostnad	297	196	236
Bränsle + underhåll	400	228	275
Personal	353	353	353
Totalt	1050	777	865

2.2.4 Skotare

I modellen delades skotningen upp i huvudsortiment och småsortiment (se stycke 2.2.2.). För varje extra sortiment minskar skotarens produktivitet med 3% baserat på Brunberg och Arlinger (2001) för att simulera att sortimentsdensiteten minskar, skotningsavståndet ökar, och det ökade planerings- och sorteringsarbetet för skotarföraren. Produktiviteten för skotning baserades på Nurminen (2006) och beräknades enligt ekvation 6.

$$P_{\text{skotning}} = (60 / T_{\text{tot skotning}}) \times (1 - (((\alpha - 1) / 100) \times 3)) \quad (\text{m}^3 \text{fpb} / \text{Götim}) \quad [6]$$

Där:

P_{skotning} är produktiviteten per effektiv arbetstimme. $(\text{m}^3 \text{fpb} / \text{Götim})$

$T_{\text{tot skotning}}$ är den totala tidsåtgången för skotningsarbetet. $(\text{min} / \text{m}^3 \text{fpb})$.

α är antalet sortiment. (n)

Det totala skotningsarbetet delades upp i fem olika arbetsmoment. Ekvationerna 7–10 baseras på (Nurminen, 2006)

$$T_{\text{tot skotning}} = t_{1 \text{ skotning}} + t_{2 \text{ skotning}} + t_{3 \text{ skotning}} + t_{4 \text{ skotning}} + t_{5 \text{ skotning}} \quad (\text{min} / \text{m}^3 \text{fpb}) \quad [7]$$

Där:

$t_{1 \text{ skotning}}$ är tidsåtgången för körning utan last $(\text{min} / \text{m}^3 \text{fpb})$

$t_{2 \text{ skotning}}$ är tidsåtgången för körning med last $(\text{min} / \text{m}^3 \text{fpb})$

$t_{3 \text{ skotning}}$ är tidsåtgången för körning under lastning $(\text{min} / \text{m}^3 \text{fpb})$

$t_{4 \text{ skotning}}$ är tiden det tar att lasta $(\text{min} / \text{m}^3 \text{fpb})$

$t_{5 \text{ skotning}}$ är tidsåtgången för lossning och körning under lossning. $(\text{min} / \text{m}^3 \text{fpb})$

$$t_{1 \text{ skotning}} + t_{2 \text{ skotning}} = ((0,7123 + 0,0149m_{\text{ta}}) / L) + ((0,9347 + 0,0185m_{\text{ta}}) / L) \quad (\text{min} / \text{m}^3 \text{fpb}) \quad [8]$$

Där:

L är skotarens lastvolym. $(\text{m}^3 \text{fpb})$

m_{ta} är medelterrängtransportavståndet. (m)

$$t_{3 \text{ skotning}} = 100 / z \times a \quad (\text{min} / \text{m}^3 \text{fpb}) \quad [9]$$

Där:

z är densiteten av det/de sortiment som ska lastas längs med körstråket.
($\text{m}^3\text{fub}/100 \text{ m}$).

a är medelhastigheten för maskinen under tiden som den lastar. (m/min)

$$z = 100b / s \quad (\text{m}^3/100 \text{ m}) \quad [10]$$

Där:

b är volymen av det sortiment som ska skotas. (m^3fub)

s är den totala längden på körstråket. (m)

För att beräkna hur tidsåtgången för lastning varierar med olika antal sortiment som lastas användes en ekvation från Manner et al. (2013) enligt ekvation 11, istället för enligt Nurminen (2006).

$$t_{4\text{skotning}} = 0,008336\alpha^2 + 0,06435\alpha + 0,8678 \quad (\text{min}/\text{m}^3\text{fub}) \quad [11]$$

Där:

α är antalet sortiment som lastas. (n)

Tidsåtgången för avlastning och körning under avlastning beräknades enligt ekvation 12 som baseras på Nurminen (2006)

$$t_{5\text{skotning}} = u_1 + u_2 + u_3 \quad (\text{min}/\text{m}^3\text{fub}) \quad [12]$$

Där:

u_1 är faktisk avlastningstid. ($\text{min}/\text{m}^3\text{fub}$)

u_2 är sortering och ordningstid. ($\text{min}/\text{m}^3\text{fub}$)

u_3 är körtid under avlastning. ($\text{min}/\text{m}^3\text{fub}$)

Körning under avlastning och faktisk avlastningstid varierar med antalet sortiment och beräknades därför enligt Manner et al. (2013) i ekvation 13 och 14. u_2 är i modellen $0,0375 \text{ min}/\text{m}^3\text{fub}$ baserat på Nurminen (2006).

$$u_1 = 0,00792\alpha^2 + 0,2312\alpha + 0,0909 \quad (\text{min}/\text{m}^3\text{fub}) \quad [13]$$

$$u_3 = 0,0789021\alpha - 0,0780896 \quad (\text{min}/\text{m}^3\text{fub}) \quad [14]$$

Även skotarens timkostnader hämtades från Ringdahl et al. (2013) se tabell 2, och är baserade på 2600 maskintimmar med en teknisk utnyttjandegrad på 90%. Utnyttjandegraden för skotaren var 90 % i denna modell. Konstanten 0,88 användes för att omvandla m^3fub till m^3fub (Skogssverige, 2016). Kostnaden beräknades enligt ekvation 15.

$$K_{\text{skotning}} = (KT_{\text{skotning}} / (P_{\text{skotning}} \times TU_{\text{skotning}})) / c_1 \quad (\text{kr}/\text{m}^3\text{fub}) \quad [15]$$

Där:

K_{skotning} är kostnaden för skotarens arbete.	(kr/m ³ fub)
KT_{skotning} är skotarens timkostnad.	(kr/tim)
P_{skotning} är skotarens produktivitet.	(m ³ fub/G ₀ tim)
TU_{skotning} är skotarens tekniska utnyttjandegrad.	(%)
c_1 är omvandlingstal mellan m ³ fub och m ³ fub.	(m ³ fub/m ³ fub)

2.2.5 Lunnare

Lunnaren används i helstamssystemet. Produktivitet för Lunning baseras på en studie av Hiesl och Benjamin (2013) gjord i Maine, USA. Studien gjordes på både löv- och barrträd (Balsamgran (*Abies balsamea*), Red Spruce (*Picea rubens*), asp (*Populus sp.*) och pappersbjörk (*Betula papyrifera*)) som var ungefär i samma storlek som träden i Sverige och på marker med lutning mellan 0–14 % vilket är normala lutningar på de flesta trakter i Sverige. Enligt Hiesl och Benjamin (2013) har inte heller olika trädslag någon signifikant effekt på tidsåtgången vid lunning. Studiens produktivitetsmodeller ansågs därför lämpliga att använda. Lunnaren antogs få med sig 3 kubikmeter virke per vända då detta var en normal volym i Hiesl och Benjamins studie. Produktiviteten beräknades enligt ekvation 16.

$$P_L = e^{(2,632 - 0,002 \times m_{ta} + 0,314 \times V_{grip})} \times 0,88 \quad (\text{m}^3\text{fub}/G_0\text{tim}) [16]$$

Där:

P_L är lunnarens produktivitet.	(m ³ fub/G ₀ tim)
m_{ta} är medelterrängtransportavståndet.	(m)
V_{grip} är den virkesvolym som ryms i gripen per vända.	(m ³ fub)

Lunnarens timkostnad hämtades från Hiesl (2013). För att sedan dela upp kostnaden på samma kategorier som skördaren och skotaren antogs personalkostnaden vara densamma, och resterande kostnader ha samma fördelning av totalkostnaden som för skotaren (tabell 2). Lunnarens tekniska utnyttjandegrad antogs vara 70%. Kostnaden för lunnarens arbete beräknades enligt ekvation 17.

$$K_{\text{lunning}} = KT_{\text{lunnare}} / (P_L \times TU_{\text{lunnare}}) \quad (\text{kr}/\text{m}^3\text{fub}) \quad [17]$$

Där:

K_{lunning} är kostnaden för lunnarens arbete.	(kr/m ³ fub)
KT_{lunnare} är lunnarens timkostnad.	(kr/tim)
P_L är lunnarens produktivitet.	(m ³ fub/G ₀ tim)
TU_{lunnare} är lunnarens tekniska utnyttjandegrad.	(%)

2.2.6 Transport

För att beräkna transportarbetets kostnader delades arbetet upp i transport (K_T) och lastning + lossning (K_L). För varje extra sortiment i kortvirkessystemet antas transportkostnaden öka med 4,6% baserat på Carlgren et al. (2006). Kostnadsökningen

beror på att det genomsnittliga transportavståndet ökar desto fler sortiment som ska transporteras, sortiment med små volymer innebär att varje lastbil måste besöka flera avlägg för att få ett fullt sortimentsrent lass och att transportplaneringen blir svårare och därmed dyrare. I helstamssystemet antas hanteringen av de hela stammarna ta 50% längre tid per lass att lasta på och lasta av (tabell 1). Ekvation 18 användes för att beräkna kostnaden för Lastning + Lossning per vända och lass.

$$K_L = K_{tid} \times (t_s + t_t) \quad (\text{kr/Lastbilslass}) [18]$$

Där:

K_L är kostnad för lastning + Lossning. (kr)
 K_{tid} är fast tidskostnad. (kr/tim)
 t_s är tid i skogen. (tim)
 t_t är tid på terminal. (tim)

Ekvation 19 användes för att beräkna kostnaden för transportarbetet per vända och lass och baseras på Gillekalkyl (2013).

$$K_T = 2 \times a_{vs} \times (K_{sträcka} + K_{tid} / v) \quad (\text{kr/lastbilslass}) [19]$$

Där:

K_T är kostanden för transportarbetet. (kr)
 a_{vs} är transportavståndet enkel väg. (km)
 $K_{sträcka}$ är sträckkostnad. (kr/km)
 K_{tid} är tidskostnad. (kr/tim)
 v är genomsnittlig körhastighet. (km/tim)

Den genomsnittliga körhastigheten beror på transportavståndet och beräknades enligt ekvation 20. Ekvationen är hämtad från Gillekalkyl (2013) och gäller för transportavstånd upp till 200 km. Det genomsnittliga transportavståndet 2016 var 67 km från skog till terminal, 54 km från terminal till industri och 95 km från skog till industri (Davidsson & Asmöarp, 2019) vilka är de avstånd som användes i modellen. I kortvirkessystemet antogs en sjättedel av volymen transporteras via terminal och resterande volym direkt till industri. I Helstamsmetoden transporteras all volym till terminal för aptering och sortering innan den körs till industri.

$$v = 45,86 + 0,2531 \times a_{vs} - 0,000651 \times a_{vs}^2 \quad (\text{km/tim}) [20]$$

Den totala kostnaden för transportarbetet per vända beräknas genom $K_T + K_L$. För att få kostnaden per m^3 sub användes ekvation 21. Lastvikten antas vara densamma för båda systemen (tabell 1) då stockarna i helstamssystemet antas lastas om lott med rotändarna.

$$K_{TR} = (K_T + K_L) / (l/c_2) \quad (\text{kr/ } m^3 \text{ sub}) [21]$$

Där:

K_{TR} är transportkostnad. (kr/m³fub)
l är lastvikt per transport. (ton)
 c_2 är omvandlingstal från ton till m³fub. (ton/m³fub)

2.2.7 Terminal

Terminalarbetet lades till som en kostnad. I terminalkostnaden ingår anläggningskostnader, maskinkostnader, personalkostnader, elkostnader mm. Grundkostnaden för terminalarbetet antas vara 30 kr/m³fub baserat på (Pålsson, 2015). I kortvirkessystemet transporteras en sjättedel av volymen via terminal vid 1 sortiment och resten direkt till industrin. För varje extra sortiment i kortvirkessystemet antogs det att 2% mer av den totala volymen transporteras via terminal. Terminalkostnaden för kortvirkessystemet beräknades enligt ekvation 22.

$$TK = k/6 + (\alpha \times ((k \times 0,02) - (k \times 0,02))) \quad (\text{kr/m}^3\text{fub}) \quad [22]$$

Där:

TK är den totala terminalkostnaden. (kr/m³fub)
k kubikmeterkostnaden. (kr/m³fub)
 α är antalet sortiment. (n)

I helstamssystemet där stockarna även ska apteras och sorteras på terminalen antogs kostnaden vara det dubbla, 60kr/m³fub och all volym måste transporteras via terminal innan virket kan levereras till industrin. Det som antas dubblera kostnaden är stora ökningar i anläggningskostnader för att aptera och sortera virket med hjälp av röntgenteknik. Det kommer även behövas mer personal, maskiner mm men det antas bero på mängden volym som terminalen ska hantera så kostnaden per m³fub påverkas inte av dessa ökningar.

2.2.8 Automation

För att undersöka hur automation kan påverka de olika drivningssystemen gjordes analyser där en variabel i drivningen förändrades för att simulera en effekt av automation baserat på litteratur, samtal med kunniga inom ämnet och egna antaganden.

De inslag av automation i drivningskedjan som testades var:

- Automationsscenario 1: Personalkostnaden antas sjunka till 50 % av ursprungskostnaden för att simulera en halvering av maskinförarnas arbetsinsats tack vare fjärrstyrda maskiner eller autonoma maskiner.
- Automationsscenario 2: Bränslekostnaden antas sjunka till 80% av ursprungskostnaden. Tanken var att maskiner som kan köra autonomt har jämnare varvtal med mindre toppar och dalar än när en förare gasar och

bromsar. Det är också troligt att maskinerna åtminstone blir delvis elektrifierade vilket skulle minska bränslekostnaden.

- Automationsscenario 3: Körhastigheten antas öka med 10% från ursprungshastigheten. Lunnarens produktivitet ökar med 9% då produktivitetsformeln som användes ej är uppdelad på arbetsmoment eller använder hastighet som variabel. Lunnaren kör absolut största delen av sin arbetstid då den endast stannar för att greppa virke eller för att lämna virke och en hastighetsökning på 10% antas därför ge en total produktivitetshöjning på 9%. Resonemanget varför autonoma maskiner skulle köra snabbare är att det begränsande för körhastighet idag är förarens hälsa och säkerhet. Vid högre hastigheter skulle föraren utsättas för betydligt mer helkroppsvibrationer och stötar vilket skulle öka antalet skador.
- Automationsscenario 4: Ett scenario där alla tre ovanstående ändringar testades samtidigt.

2.2.9 Beståndsdata

Den beståndsdata som används som ingångsvärden i modellen är medelstamsvolym, medeltransportavstånd och volym/ha. Ingångsvärden baserades på statistik från åren 2008 – 2016 (Brunberg, 2017). Den data som användes var den senaste från 2016 eftersom medelstamsvolym och volymen/ha har haft en stigande trend från 2008. Medelterrängtransportavståndet har däremot varit i princip konstant sett till hela Sverige under perioden. Samtliga värden som användes i modellen finns i tabell 1.

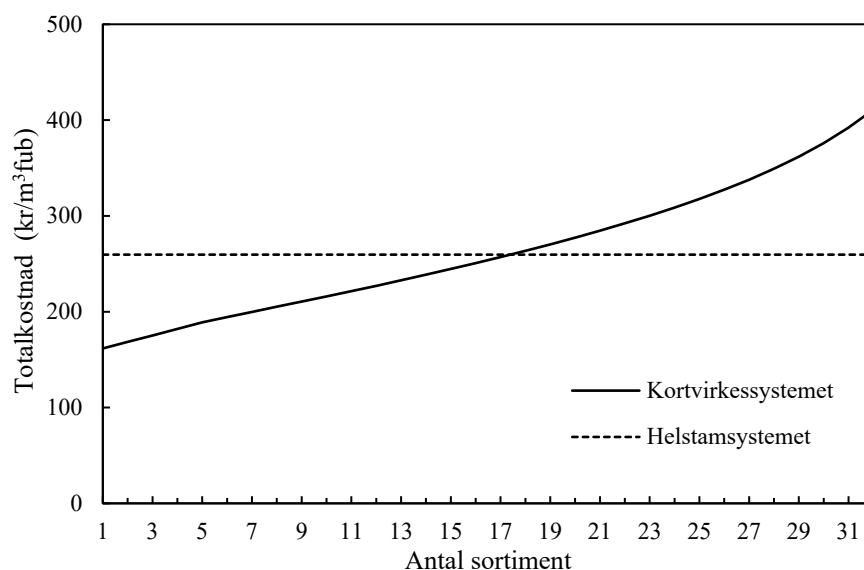
2.3 Känslighetsanalys

Som redovisas ovan så består arbetets modell av ett antal delmodeller, som gör att det sammantaget blir många ingångsvariabler i modellen (tabell 1). Varje ingångsvärde i en beräkning har ett visst medelfel som kan påverka resultatet. Dessutom är underlaget för de olika variabelvärdena olika omfattande. För att undersöka hur robusta resultaten är så gjordes en känslighetsanalys där varje variabel ändrades var för sig med 10, 20 och 50 % både lägre och högre och vilket utslag det gav på resultatet. Även variabler som var beroende av en ingångsvariabel testades för att se hur ändringar i till exempel ett arbetsmoment för skotaren påverkar resultatet. De beroende variablerna testades även för att se hur en förändring inom de arbetsmomenten på grund av automation påverkar resultatet. Eftersom känslighetsanalysen ska visa hur ändringar i variablerna påverkar kostnaden vid olika antal sortiment blir mängden data väldigt stor. Därför redovisas resultat för tre olika antal av sortiment, 5, 15, och 25. De variabler som påverkade relationen mellan systemen mest testades mer ingående genom att se hur förändringar i dessa variabler påverkade skärningspunkten i antal sortiment då systemen hade samma totalkostnad.

3 Resultat

3.1 System

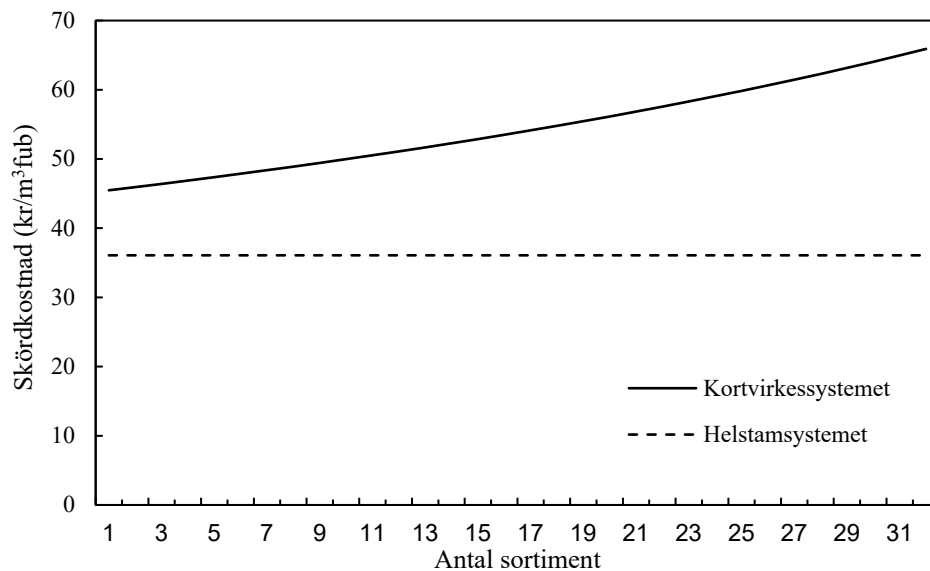
I grundscenariot med uttagsvolymen uppdelad på fem huvudsortiment och där varje ytterligare sortiment var 5 m³ ökade kostnaden för kortvirkessystemet nästan linjärt med ca 6–7 kr/m³fub för varje sortiment (Fig 3). Helstamssystemets kostnad var konstant då inget av momenten påverkades av ett ökat antal sortiment. Kortvirkessystemet var billigast så länge uttagsvolymen delades upp på 18 eller färre sortiment (Fig 3). Helstamssystemet var vid 5 sortiment 71 kr/m³fub (37%) dyrare än kortvirkessystemet. Det omvända förhållandet hittas vid 26 sortiment då helstamssystemet var 68 kr (21%) billigare per m³fub.



Figur 3. Totalkostnad för kortvirkessystemet och helstamssystemet beroende av antal sortiment.

Figure 3. Total cost for the cut-to-length and whole-stem system depending on the number of assortments.

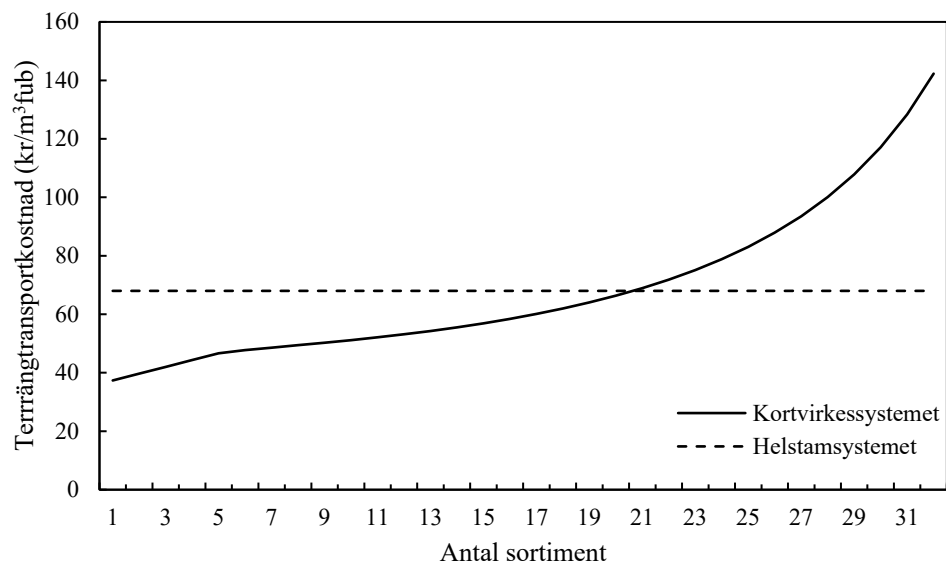
I momentet skörd var helstamssystemet billigare oavsett antalet sortiment. Kortvirkessystemet hade en stigande nästan linjär trend och helstamssystemet var konstant och påverkades inte av antalet sortiment (Fig 4). Vid 5 sortiment var helstamssystemet 24% billigare per m³ fub och för varje ytterligare sortiment ökade kostnadsskillnaden med 0,5–1 procentenheter. Vid 18 sortiment, då totalkostnaden var ungefär lika mellan systemen (Fig 3), hade helstamssystemet 34% lägre kostnad per m³ fub för momentet skörd (Fig 4).



Figur 4. Skördkostnad för kortvirkessystemet och helstamssystemet beroende av antal sortiment.

Figure 4. Harvest cost for the cut-to-length- and whole-stem system depending on the number of assortments.

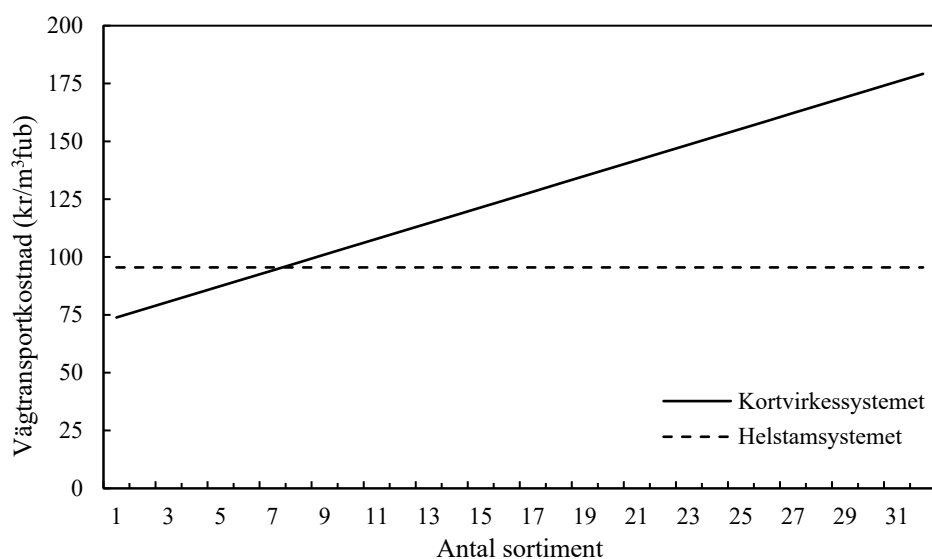
Kortvirkessystemets terrängtransportkostnad hade en linjär kostnadsökning för varje extra huvudsortiment och en tilltagande ökning med varje extra småsortiment. Helstamssystemets terrängtransportkostnad var konstant och påverkades inte av antalet sortiment. Skärningspunkten för momentet terrängtransport var 21 sortiment, då kortvirkessystemet blev dyrare än helstamssystemet (Fig 5). Vid 5 sortiment hade kortvirkessystemet 46% lägre kostnad än helstamssystemet för terrängtransporten. Helstamssystemet hade lägre totalkostnad vid 18 sortiment (Fig 3) men terrängtransportkostnaden var då fortfarande 10% högre än för kortvirkessystemet (Fig 5).



Figur 5. Terrängtransportkostnad för kortvirkessystemet och helstamssystemet beroende av antal sortiment.

Figure 5. Terrain transport cost for the cut-to-length- and whole-stem system depending on the number of assortments.

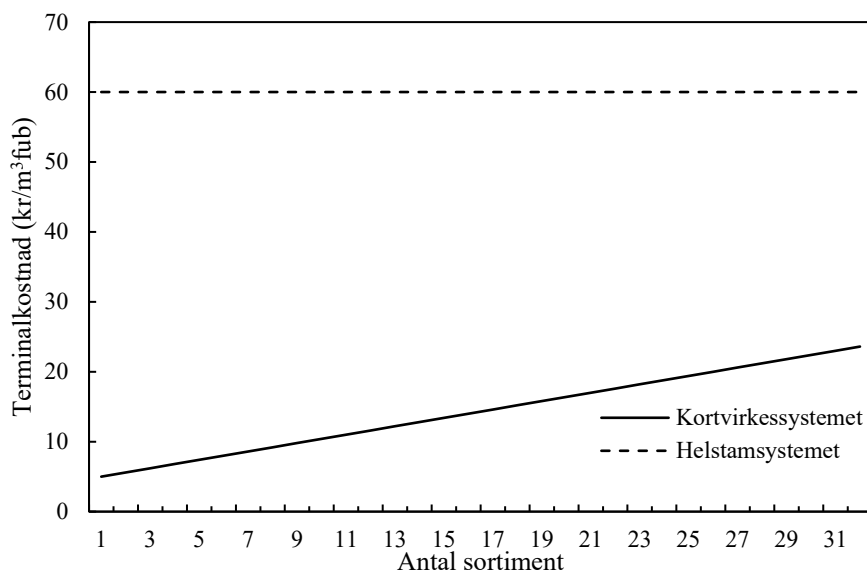
Vägtransportkostnaden för kortvirkessystemet påverkades kraftigt linjärt när uttagsvolymen fördelas på fler antal sortiment (Fig 6) och var den del av kortvirkes-systemet som påverkades mest av ett ökat antal sortiment. Helstamssystemet vägtransportkostnad var konstant. Vid 8 eller fler sortiment var kortvirkessystemets vägtransporter dyrare än för helstamssystemet och ökade med ca 3 kr/m³fub för varje nytt sortiment. Vid 18 sortiment hade helstamssystemet 27% lägre kostnad för vägtransporterna än kortvirkessystemet.



Figur 6. Vägtransportkostnad för kortvirkessystemet och helstamssystemet beroende av antal sortiment.

Figure 6. Road transport cost for the cut-to-length- and whole-stem system depending on the number of assortments.

Terminalkostnaden var betydligt dyrare för helstamssystemet och var konstant oavsett antalet sortiment (Fig 7). Kortvirkessystemet hade en linjär ökande trend med antalet sortiment. Vid 5 sortiment var helstamssystemets terminalkostnad mer än sju gånger så hög som för kortvirkessystemet. Vid 18 sortiment, då kortvirkessystemet blev dyrare än helstamssystemet (Fig 3), var terminalkostnaden för helstamssystemet ca 3 gånger så hög som för kortvirkessystemet (Fig 7).

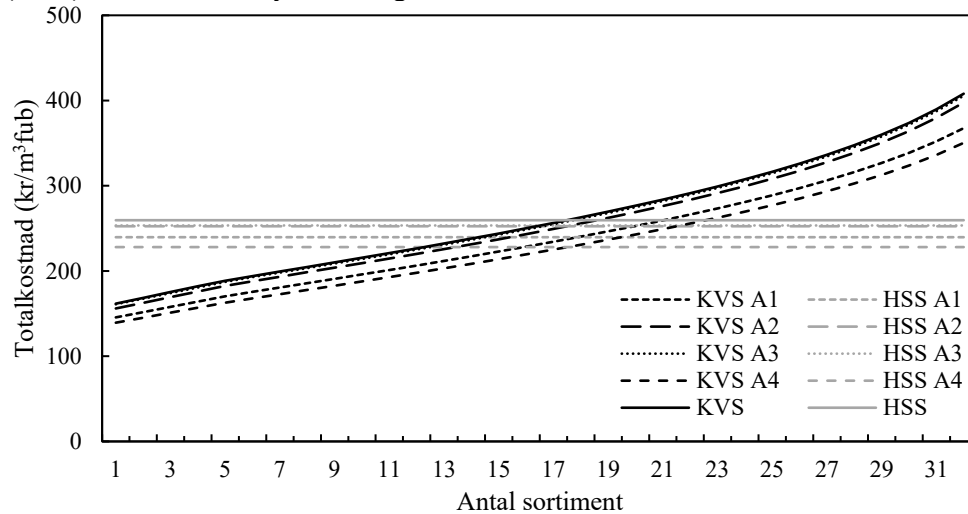


Figur 7. Terminalkostnad för kortvirkessystemet och helstamssystemet beroende av antal sortiment.

Figure 7. Log yard cost for the cut-to-length- and whole-stem system depending on the number of assortments.

3.2 Automation

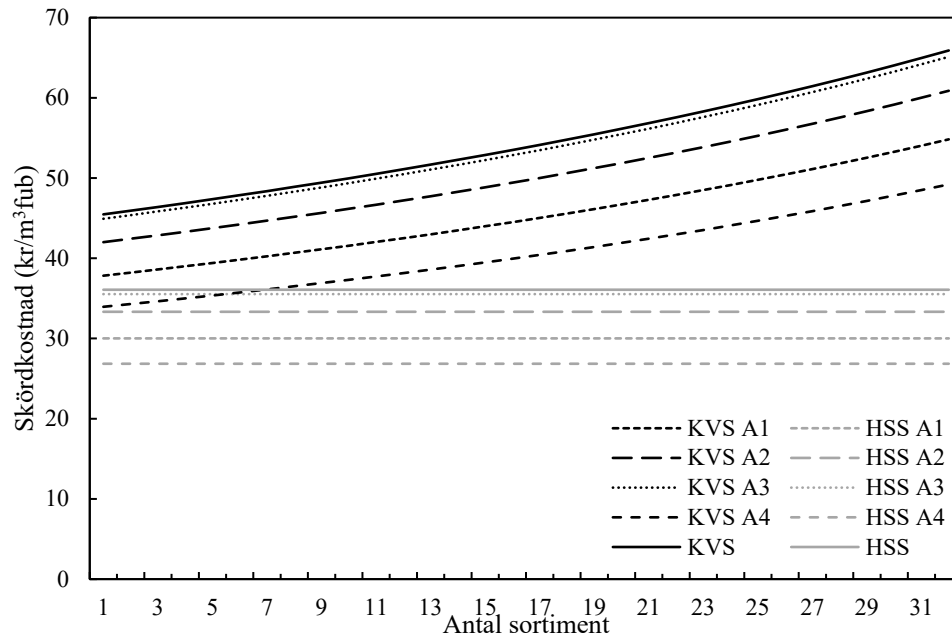
De två systemen påverkades ungefär lika mycket av de olika automationsscenarioerna och skärningspunkten mellan systemen var 18 sortiment precis som utan automation. Undantaget var viden högre körhastighet (A3 Fig 8) då helstamssystemet sänkte kostnaderna något mer och var därför mer lönsamt vid 17 eller fler sortiment. Den relativa sänkningen av totalkostnaden var 12–14 % för kortvirkessystemet beroende av antalet sortiment och 12% för helstamssystemet vid alla typer av automation (A4 Fig 8). Om kortvirkessystemet hade alla typer av automation (KVS A4 Fig 8) men helstamssystemet inte hade någon form av automation (HSS Fig 8) flyttades skärningspunkten till 23 sortiment innan helstamssystemet hade lägre totalkostnad. Vid det omvända scenariot, där helstamssystemet har alla typer av automation (HSS A4 Fig 8) och kortvirkessystemet ej har automatiserats (KVS), hade helstamssystemet lägre kostnad vid 13 eller fler sortiment.



Figur 8. Automationsscenarioernas påverkan på totalkostnaden för både kortvirkessystemet (KVS) och helstamssystemet (HSS).

Figure 8. The automation scenarios effect on the total cost for both the cut-to-length-system (KVS) and whole-stem-system (HSS).

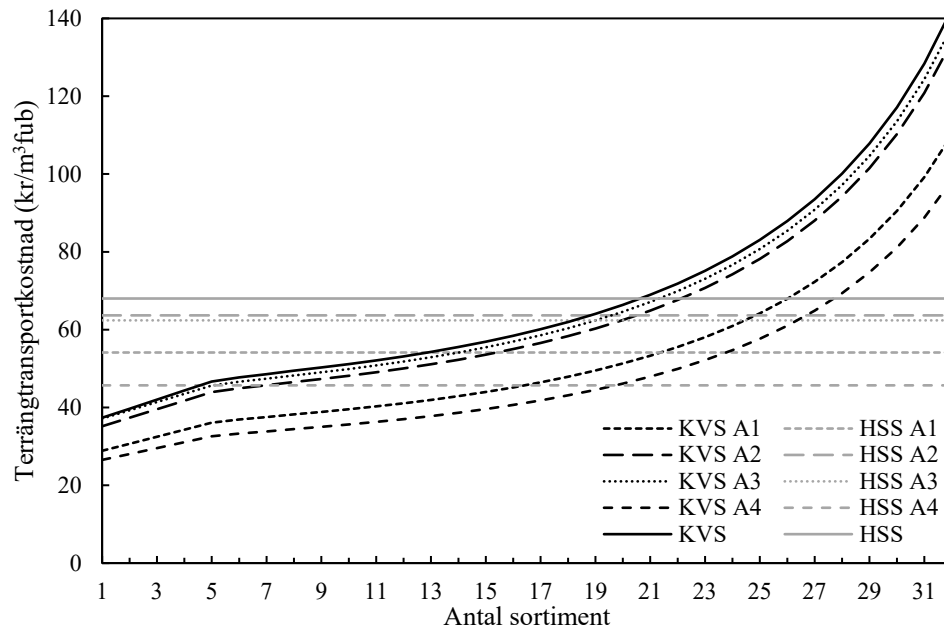
Inom momentet skörd påverkades de två systemen i princip lika mycket av de olika typerna av automation. Den mest betydande effekten av automation var den sänkta personalkostnaden (A1 i Fig 9), vilket sänkte kostnaden för skörd med 17% för båda systemen. En minskad bränsleförbrukning (A2 i Fig 9) sänkte kostnaden för skörd med 8% för båda systemen. Skördkostnaden sjönk med 1% för kortvirkessystemet och 2% för helstamssystemet till följd av en högre körhastighet (A3 i Fig 9).



Figur 9. Automationsscenarioernas påverkan på momentet skörd för både kortvirkessystemet (KVS) och helstamssystemet (HSS).

Figure 9. The automation scenarios effect on the harvest for both the cut-to-length-system (KVS) and whole-stem-system (HSS).

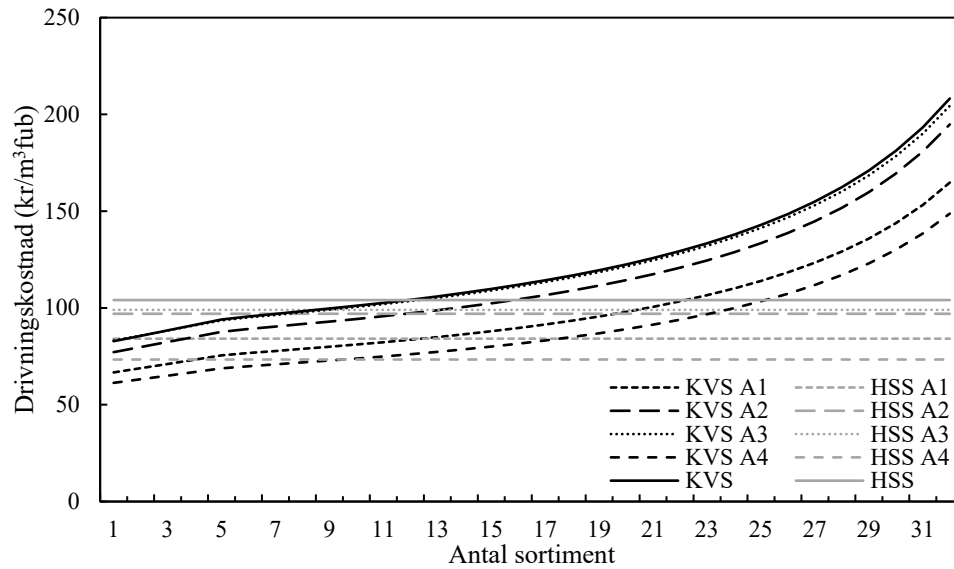
Terrängtransportens kostnader sänktes med 23% för kortvirkessystemet och 20 % för helstamssystemet till följd av lägre personalkostnader (A1 Fig 10). En lägre bränsleförbrukning (A2 Fig 10) ledde till 6% kostnadssänkning för båda systemen. En högre körhastighet (A3 Fig 10) påverkade helstamssystemet mer med en kostnadssänkning på 8% medan kortvirkessystemet sänkte terrängtransportkostnaden med 1–3% beroende på antalet sortiment. Med alla typer av automation (A4 Fig 10) sänktes kostanden för terrängtransporten med 33% för helstamssystemet och 29–31% för kortvirkessystemet beroende på antalet sortiment.



Figur 10. Automationsscenariernas påverkan på momentet terrängtransport för både kortvirkessystemet (KVS) och helstamssystemet (HSS).

Figure 10. The automation scenarios effect on the terrain transport for both the cut-to-length-system (KVS) and whole-stem-system (HSS).

Totalt sett sänkte helstamssystemet drivningskostnaderna mer än kortvirkessystemet till följd av automation. Helstamssystemet sänkte drivningskostnaden per kubikmeter med 30% medan kortvirkessystemet minskade kostnaden med 27–29% beroende på antalet sortiment för alla automationseffekter tillsammans (A4 Fig 11). Båda systemen påverkades lika mycket av den minskade bränslekostnaden och sänkte drivningskostnaden med 7% (A2 Fig 11). Kortvirkessystemet sänkte drivningskostnaden med 19–21% till följd av en minskad personalkostnad (A1 Fig 11) beroende på antalet sortiment medan helstamssystemet sänkte drivningskostnaden med 19%. En högre körhastighet (A3 Fig 11) sänkte drivningskostnaden med 2% respektive 6% för kortvirkessystemet respektive helstamssystemet. Om kortvirkessystemet automatiserats med alla typer av automation (A4 Fig 11) och helstamssystemet inte automatiserats (A1, Fig 11) så var kortvirkessystemets drivningskostnader lägst oavsett antalet sortiment. Vid det omvända förhållandet var drivning med helstamssystemet billigare än kortvirkessystemet vid alla sortimentantal.

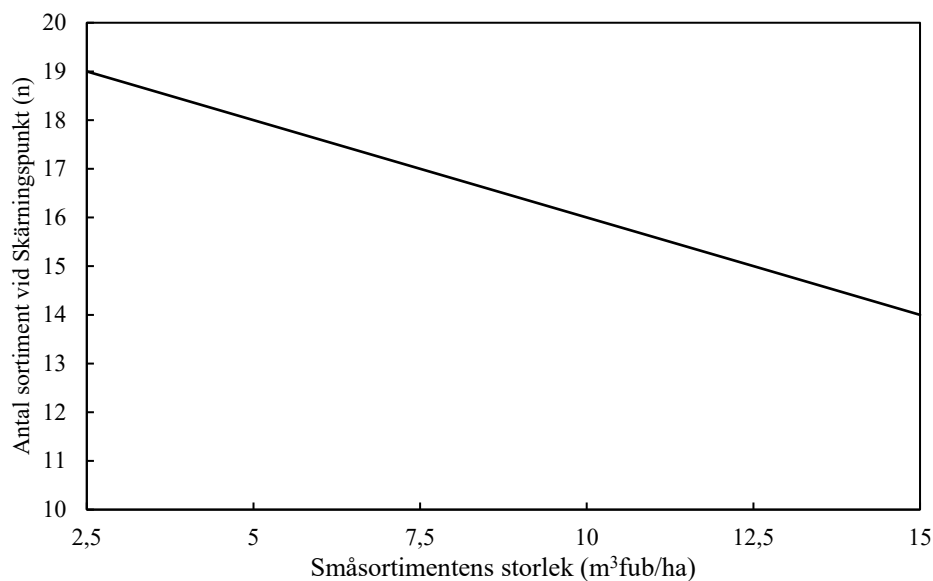


Figur 11. Automationsscenarionas påverkan på drivningen för både kortvirkessystemet (KVS) och helstamssystemet (HSS).

Figure 11. The automation scenarios effect on the forest operations for both the cut-to-length-system (KVS) and whole-stem-system (HSS).

3.3 Känslighetsanalys

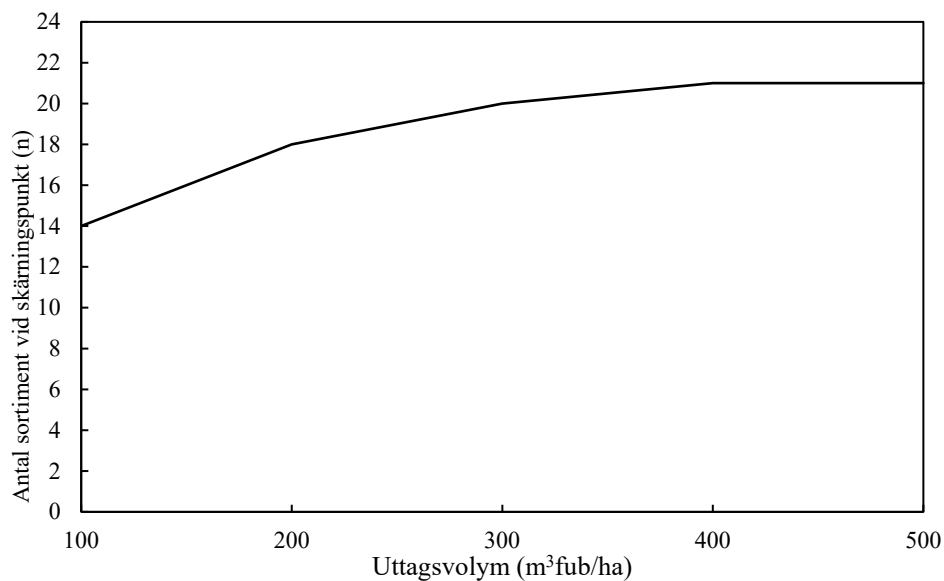
Beroende av småsortimentens storlek så ändrades skärningspunkten för när helstamssystemets totalkostnad blev lägre än kortvirkessystemet med ett linjärt samband med en sänkning av ca ett sortiment per 2,5 m³fub ökning av volymen småsortimenten (Fig 12). Trenden var att desto större småsortimenten var desto färre sortiment krävdes det innan helstamssystemet hade lägre totalkostnad.



Figur 12. Förändring i skärningspunkten när helstamssystemet har lägre totalkostnad än kortvirkes-systemet beroende av småsortimentens storlek.

Figure 12. Change in the intersect when the whole-stem-system have lower total cost than the cut-to-length-system depending on the size of the small-assortments.

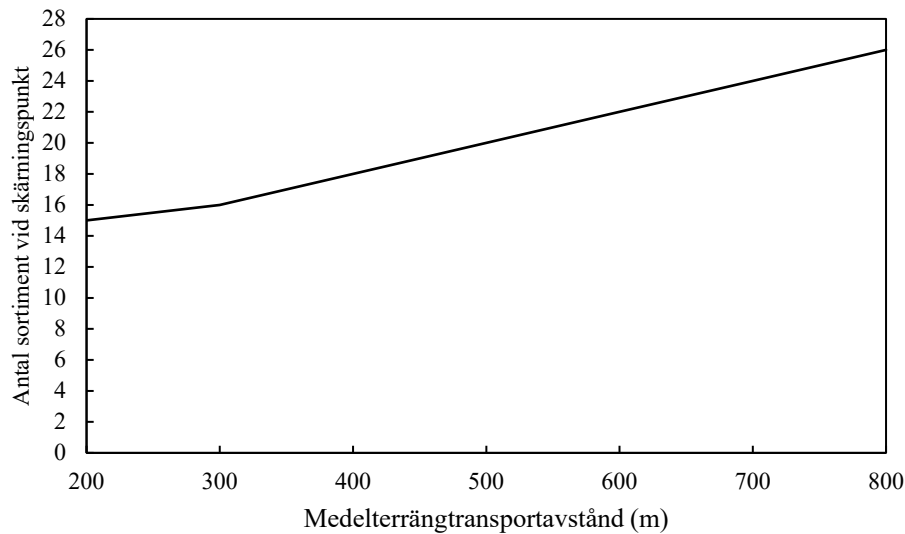
Kortvirkes-systemet påverkades mer positivt vid större uttagsvolymmer än helstams-systemet upp till 400 m³ fub/ha då effekten planade ut (Fig 13). Om uttagsvolymen var mindre än 200 m³ fub/ha gynnades helstamssystemet kraftigt.



Figur 13. Förändring i skärningspunkten när helstamssystemet har lägre totalkostnad än kortvirkes-systemet beroende av uttagsvolymen per hektar.

Figure 13. Change in the intersect when the whole-stem-system have lower total cost than the cut-to-length-system depending on the extracted volume per hectare.

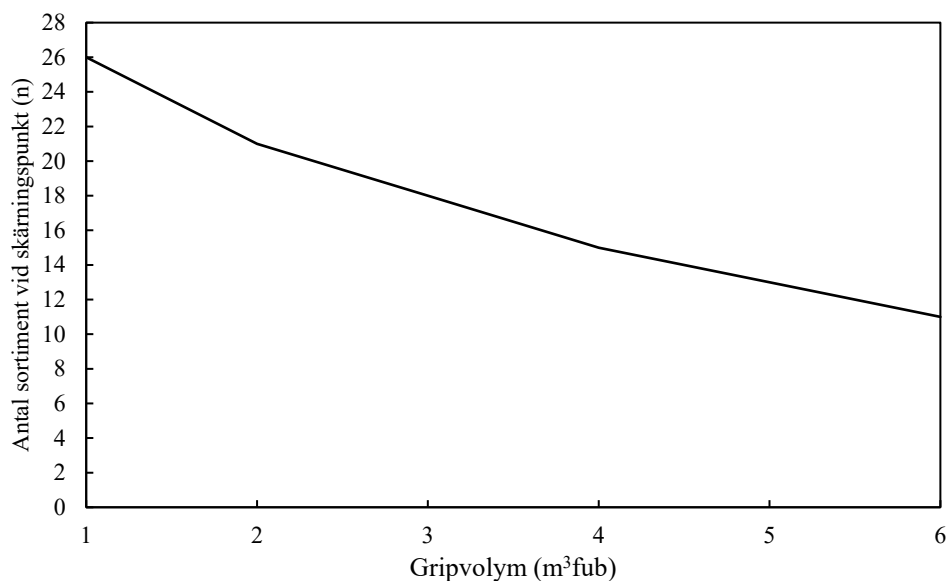
Medelterrängtransportavståndet hade en positiv nästan linjär trend med skärningspunkten mellan systemen (Fig 14). För var hundra meter längre medeltransportavstånd ändrades skärningspunkten mellan systemen med ca 2 sortiment.



Figur 14. Förändring i skärningspunkten när helstamssystemet har lägre totalkostnad än kortvirkes-systemet beroende av medelterrängtransportavståndet.

Figure 14. Change in the intersect when the whole-stem-system have lower total cost than the cut-to-length-system depending on the mean terrain transport distance.

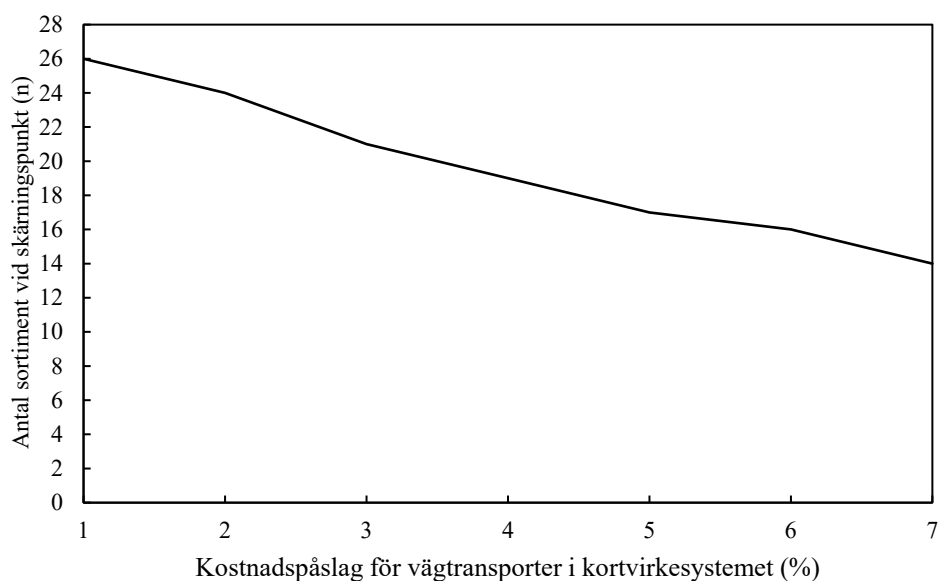
Hur mycket volym lunnaren fick med sig per griptag (vända) hade stor påverkan på resultatet. Desto mer volym lunnaren fick med sig per vända desto lägre blev skärningspunkten mellan systemen (Fig 15). Modellen var extra känslig för om lunnarens gripvolym minskades.



Figur 15. Förändring i skärningspunkten när helstamssystemet har lägre totalkostnad än kortvirkes-systemet beroende av lunnarens gripvolym.

Figure 15. Change in the intersect when the whole-stem-system have lower total cost than the cut-to-length-system depending on the size of the skidders grapple volume.

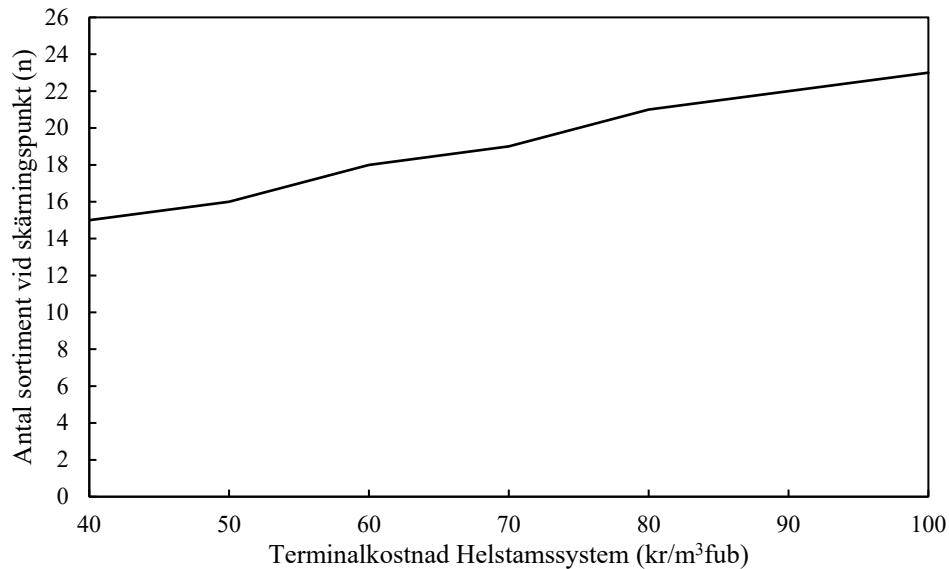
Kostnadspåslaget för extra antal sortiment i korvirkesystemets vägtransporter hade stor påverkan på resultatet. 1 procentenhets skillnad i kostnadspåslag gav ca 2 sortiments skillnad i skärningspunkten mellan systemen (Fig 16).



Figur 16. Förändring i skärningspunkten när helstamssystemet har lägre totalkostnad än kortvirkes-systemet beroende av storleken på kostnadspåslaget per sortiment för vägtransporten.

Figure 16. Change in the intersect when the whole-stem-system have lower total cost than the cut-to-length-system depending on the size of the cost increase for the road transport for each added assortment.

Helstamssystemets terminalkostnad var en osäker del av modellen och påverkar skärningspunkten mellan systemen. För varje ökning om 10 kr/m³fub i terminalkostnaden för helstamssystemet så behövdes ytterligare 1–2 sortiment sorteras ut innan helstamssystemet får en lägre kostnad än kortvirkessystemet (Fig 17).



Figur 17. Förändring i skärningspunkten när helstamssystemet har lägre totalkostnad än kortvirkessystemet beroende av helstamssystemets terminalkostnad.

Figure 17. Change in the intersect when the whole-stem-system have lower total cost than the cut-to-length-system depending on the whole-stem-systems terminal cost.

Nästa del av känslighetsanalysen redovisas i tre tabeller för kortvirkessystemet för att visa skillnader vid olika antal sortiment. I Bilaga 1 finns tabeller med resultat från känslighetsanalysen för 5 respektive 25 sortiment. I tabell 4 nedan visas resultatet vid 15 sortiment. Fem av de sex variablerna som var känsligas för ändringar i kortvirkessystemet hörde till vägtransporten vilket ger stor osäkerhet för den delen av modellen. Förändringar i medelstam gav också stora förändringar i resultatet, framförallt vid lägre medelstam. Övriga variabler som påverkade resultatet relativt mycket var personalkostnad, lastvolym och körhastighet för skotaren. Resterande variabler gav mindre än 5% utslag på resultatet vid en 50% ändring i variabeln, vilket individuellt inte ger så stor osäkerhet men flera variabler tillsammans kan fortfarande ge stor påverkan på resultatet.

Tabell 4. Relativ förändring av totalkostnaden (%) vid ändring av värdet på ingångsvariabler och beräknade variabler från grundscenariot för kortvirkessystemet vid 15 sortiment.
Table 4. Change in total cost when the value of entry variables and calculated variables are changed from the base scenario for the cut-to-length-system at 15 assortments.

Variabel	Förändring av ingångsvariabler och beräknade variabler från grundscenariot (%)					
	-50	-20	-10	+10	+20	+50
Lastvikt vägtransport	47,1	11,8	5,2	-4,3	-7,9	-15,7
Avstånd skog - industri	-17,0	-6,8	-3,4	3,4	6,8	17,0
Sträckkostnad skog - industri	-10,0	-4,0	-2,0	2,0	4,0	10,0
Kostnadsökning vägtransport	-9,2	-3,7	-1,8	1,8	3,7	9,2
Medelstam	13,1	3,3	1,5	-1,2	-2,3	-4,6
Tidskostnad skog - industri	-8,8	-3,5	-1,8	1,8	3,5	8,8
Personalkostnad skotare	-6,2	-2,5	-1,2	1,2	2,5	6,2
Lastvolym skotare	7,2	1,8	0,8	-0,7	-1,2	-2,4
Körhastighet skotare	7,1	1,8	0,8	-0,7	-1,2	-2,4
t ₄ skördare	-4,2	-1,7	-0,8	0,8	1,7	4,2
t ₄ skotare	-4,2	-1,7	-0,8	0,8	1,7	4,2
Bränslekostnad skotare	-4,0	-1,6	-0,8	0,8	1,6	4,0
Bränslekostnad skördare	-3,9	-1,6	-0,8	0,8	1,6	3,9
Total stickvägslängd	-3,7	-1,5	-0,7	0,7	1,4	3,6
t ₃ skotare	-3,7	-1,5	-0,7	0,7	1,4	3,6
Personalkostnad skördare	-3,4	-1,4	-0,7	0,7	1,4	3,4
Maskinkostnad skotare	-3,4	-1,4	-0,7	0,7	1,4	3,4
Terrängtransportavstånd	-3,2	-1,3	-0,6	0,6	1,3	3,2
Maskinkostnad skördare	-2,9	-1,2	-0,6	0,6	1,2	2,9
Terminalkostnad	-2,6	-1,0	-0,5	0,5	1,0	2,6
Avstånd skog - terminal	-2,4	-0,9	-0,5	0,5	0,9	2,4
t ₅ skotare	-2,2	-0,9	-0,4	0,4	0,8	2,1
t ₂ skotare	-2,0	-0,8	-0,4	0,4	0,8	2,0
Avstånd terminal - industri	-1,9	-0,8	-0,4	0,4	0,8	1,9
t ₃ skördare	-1,9	-0,8	-0,4	0,4	0,8	1,9
u ₁	-1,9	-0,7	-0,4	0,4	0,7	1,8
Volymökning 15 sort	-1,6	-0,7	-0,3	0,3	0,7	1,6
t ₂ skördare	-1,6	-0,6	-0,3	0,3	0,6	1,6
t ₁ skotare	-1,6	-0,6	-0,3	0,3	0,6	1,6
Tid skog	-1,5	-0,6	-0,3	0,3	0,6	1,5
Sträckkostnad skog - terminal	-1,5	-0,6	-0,3	0,3	0,6	1,5
Sträckkostnad terminal - industri	-1,3	-0,5	-0,3	0,3	0,5	1,3
t ₁ skördare	-1,2	-0,5	-0,2	0,2	0,5	1,2
Tidskostnad skog - terminal	-1,2	-0,5	-0,2	0,2	0,5	1,2

Variabel	Förändring av ingångsvariabler och beräknade variabler från grundscenariot (%)					
	-50	-20	-10	+10	+20	+50
Tidskostnad terminal - industri	-0,9	-0,4	-0,2	0,2	0,4	0,9
Tid terminal	-0,8	-0,3	-0,2	0,2	0,3	0,8
t ₅ skördare	-0,8	-0,3	-0,2	0,2	0,3	0,8
t ₆ skördare	-0,4	-0,1	-0,1	0,1	0,1	0,4
t ₇ skördare	-0,2	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,2
u ₂	-0,2	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,2
u ₃	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1

För helstamssystemet var lastvikten för vägtransporterna den variabel som påverkade resultatet mest, speciellt vid lägre lastvikter (Tabell 5). Även för helstamssystemet var vägtransporten den del i modellen med störst osäkerhet, med fem variabler som var för sig hade relativt hög påverkan på resultatet. Terrängtransporten har också relativt hög osäkerhet då terrängtransportavståndet, gripvolymen och personalkostnaden för lunnaren var för sig påverkade resultatet för helstamssystemet förhållandevis mycket. Övriga variabler som påverkade resultatet mer än 5 % vid en 50% ändring var terminalkostnaden och medelstammen. Resterande variabler gav mindre påverkan på resultatet men precis som för kortvirkessystemet kan de tillsammans ge desto större påverkan.

Tabell 5. Förändring av totalkostnaden vid ändring av värdet på ingångsvariabler och beräknade variabler från grundscenariot för helstamssystemet.
Table 5. Change in total cost when the value of entry variables and calculated variables are changed from the base scenario for the whole-stem-system.

Variabel	Förändring av ingångsvariabler och beräknade variabler från grundscenariot (%)					
	-50	-20	-10	+10	+20	+50
Lastvikt vägtransport	35,5	8,9	3,9	-3,2	-5,9	-11,8
Terrängtransportavstånd	16,1	5,5	2,6	-2,4	-4,6	-10,0
Terminalkostnad	-11,8	-4,7	-2,4	2,4	4,7	11,8
Gripvolym	-8,8	-4,0	-2,1	2,2	4,6	13,1
Avstånd skog - terminal	-8,7	-3,5	-1,7	1,7	3,5	8,7
Avstånd terminal - industri	-7,0	-2,8	-1,4	1,4	2,8	7,0
Medelstam	10,2	2,6	1,2	-0,9	-1,7	-3,5
Sträckkostnad skog - terminal	-5,5	-2,2	-1,1	1,1	2,2	5,5
Personalkostnad lunning	-5,5	-2,2	-1,1	1,1	2,2	5,5
Sträckkostnad terminal industri	-4,6	-1,9	-0,9	0,9	1,9	4,6
Tidskostnad skog terminal	-4,3	-1,7	-0,9	0,9	1,7	4,3
Bränslekostnad lunning	-4,3	-1,7	-0,9	0,9	1,7	4,3
Maskinkostnad lunning	-3,7	-1,5	-0,7	0,7	1,5	3,7
Tidskostnad terminal industri	-3,3	-1,3	-0,7	0,7	1,3	3,3
Bränslekostnad skörd	-2,7	-1,1	-0,5	0,5	1,1	2,7
Personalkostnad skörd	-2,4	-1,0	-0,5	0,5	1,0	2,4
Maskinkostnad skörd	-2,0	-0,8	-0,4	0,4	0,8	2,0
t ₄ skördare	-1,8	-0,7	-0,4	0,4	0,7	1,8
t ₃ skördare	-1,6	-0,7	-0,3	0,3	0,7	1,6
t ₂ skördare	-1,4	-0,6	-0,3	0,3	0,6	1,4
Tid skog	-1,3	-0,5	-0,3	0,3	0,5	1,3
t ₁ skördare	-1,1	-0,4	-0,2	0,2	0,4	1,1
Tid terminal	-0,7	-0,3	-0,1	0,1	0,3	0,7
t ₅ skördare	-0,7	-0,3	-0,1	0,1	0,3	0,7
t ₆ skördare	-0,3	-0,1	-0,1	0,1	0,1	0,3

4 Diskussion

4.1 Resultat

Kortvirkessystemet hade lägre totalkostnad än helstamssystemet vid de förutsättningar, ca 5 sortiment, som skogsbruket har idag (Fig 3). Det stämmer överens med resultaten från Lövgren & Warpman (1992) samt Karlsson et al. (1988) som visade att helstamssystemet hade högre kostnader. Dessa studier visade dock att helstamsmetoden kunde ha högre intäkt än kortvirkessystemet främst på grund av bättre aptering till sågverken, vilket inte modellerades i detta arbete. Kostnaden för massaveden blev dock högre på grund av längre transportavstånd i helstamssystemet enligt Karlsson et al. (1988). Helstamssystemet blev mer kostnadseffektivt vid ett ökat antal sortiment (Fig 3) vilket var väntat. Hur många sortiment som behöver sorteras ut varierar dock med vilka förutsättningar som finns som känslighetsanalysen visar. Vid just de förhållanden som antagits i grundscenariot för modellen var helstamssystemet mer kostnadseffektivt vid 18 eller fler sortiment.

I momentet skörd hade helstamssystemet lägre kostnad redan från start och kostnadsskillnaden växte med antalet sortiment (Fig 4). Kostnaden ökade inte för helstamssystemet med ett ökat antal sortiment då stammarna inte apterades ute i skogen. Samma resultat fick Hiesl och Benjamin (2013) när de jämförde skördare mot fällare-läggare. Kortvirkessystemet blev dyrare för varje ytterligare sortiment som skulle sorteras ut då skördarens produktivitet sjönk till följd av att mer tid lades på att sortera virket i enighet med (Brunberg & Arlinger 2001). Känslighetsanalysen visade att modellen var relativt säker och okänslig för förändringar av ingångsvariablerna för momentet skörd (Tabell 4–7).

Terrängtransportens kostnad i kortvirkessystemet ökade i och med att volymen delades upp mellan olika sortiment och inte enbart antalet sortiment (Fig 12). Så länge majoriteten av volymen fanns inom huvudsortimenten ökade kostnaden långsamt med varje sortiment som lades till men när majoriteten av volymen började tillhöra småsortimenten ökade kostnaden snabbt för varje ytterligare sortiment som lades till (Fig 5). I känslighetsanalysen syntes det att desto mer småsortimenten utgjorde av uttagsvolymen desto dyrare blev kortvirkessystemet och desto

större volym varje småsortiment hade desto snabbare fördelades uttagsvolymen och kostnaden ökade (Fig 12). Manner et al. (2013) kom fram till en liknande slutsats, att det var koncentrationen av olika sortiment i kombination med antalet sortiment som påverkade tidsåtgången för skotningen mest. Fler sortiment och låg sortimentskoncentration gav en högre tidsåtgång. Nurminen (2006) fann också att antalet sortiment påverkade produktiviteten för skotaren då två sortiment per lass tog längre tid än ett sortiment per lass. Vid fem sortiment var terrängtransportkostnaden för kortvirkessystemet 32% billigare än helstamssystemet och vid 21 sortiment var kostnaden (68 kr) samma för båda systemen. I känslighetsanalysen syns det att helstamssystemet var betydligt mer känsligt för hur långt terrängtransportavståndet (Fig 14) var, vilket förmodligen var den variabel som gjorde så att kortvirkessystemet var så mycket billigare. Helstamssystemet blev 16% billigare vid halva terrängtransportavståndet och 10% dyrare vid 50% längre terrängtransportavstånd (Tabell 5). För kortvirkessystemet var dessa siffror 3,2% billigare eller dyrare vid 50% kortare eller längre terrängtransportavstånd (Tabell 4). Endast sett till kostnaden för terrängtransporten blir dessa siffror 60% och 38% för lunningen och ca 12% för skotaren. Hur mycket volym lunnaren fick med sig per vända var ytterligare en av de variabler som påverkade resultatet mest (Fig 15). Antagandet att lunnaren fick med sig 3 kubikmeter per vända baserades på Hiesl och Benjamin (2013) studie men är lite osäkert eftersom den studien inte är gjord i svenska förhållanden och med svenska trädslag, även om förhållandena i studien var relativt lika de i Sverige. Detta tillsammans med terrängtransportavståndets påverkan gör lunningen till en osäker del av modellen och en av de som kan påverka förhållandet mellan systemen mest beroende på vilka förutsättningar lunnaren har.

Vägtransporterna var den del av kortvirkessystemet som påverkades mest av antalet sortiment. Med ett ökat antal sortiment med små volymer kompliceras vägtransporterna snabbt. De små volymerna gör att varje lastbil måste köra mellan flera avlägg och förmodligen även köra flera sortiment per lass. I Carlgren et al. (2006) testades effekten av att massabruk skulle beställa en exakt mix av massaved från slutavverkning och gallring vilket gav ett mer sortiment. Kostnaden ökade då med 4,6% med returer och det var detta kostnadspåslag som användes denna studie. Kostnadsökningen blev därför helt linjär vilket den förmodligen inte är i verkligheten. Känslighetsanalysen visar även att modellen är känslig för storleken på kostnadspåslaget (Fig 16). Vid 1–5 sortiment var kortvirkessystemet billigare än helstamssystemet (Fig 6). Detta stämmer överens med resultaten från tidigare studier i Sverige när det fanns sågverk som tog emot hela stammar där vägtransporterna var helstamssystemets största svaghet mot kortvirkessystemet och det vanliga antalet sortiment var ofta 3–4 stycken (Larsson & Nilsson, 1977; Granqvist, 1977, Karlsson et al., 1988). Den främsta anledningen varför vägtransporterna blev dyrare var att transportavståndet blev längre. I Larsson och Nilssons (1977) studie så var en anledning till att vägtransporterna med helstam blev dyrare att det inte gick att lasta lika mycket volym då systemet krävde att alla stockar hade rotändan mot hytten. Denna faktor har i tagits bort från detta arbete då stockarna antas lastas med rotändan om lott.

Terminalkostnaden var den del i försörjningskedjan där det skiljde mest mellan de två systemen. Vid 5 sortiment hade helstamssystemet mer än 8 gånger så dyr terminalkostnad och vid 18 sortiment ca 3 gånger dyrare (Fig 7). Den stora skillnaden berodde på två faktorer. Den första var en dubbelt så dyr grundkostnad per m³fub för helstamssystemet då terminalen antogs behöva vara större och vara utrustad med röntgenutrustning och ett apteringssågverk. Detta antagande har dock stor osäkerhet, och effekten på resultatet av variation i terminalkostnaden var stor enligt känslighetsanalysen (Fig 17). Eftersom helstamssystemets terminalarbete inte modellerats mer än att en kostnad lades på och storleken på den kostnaden påverkade resultatet i stor utsträckning så är detta en av modellens osäkraste och svagaste delar. Den andra faktorn var att kortvirkessystemet inte behövde transportera all volym via terminaler vilket helstamssystemet krävde. Idag transporteras ca en sjättedel av volymen via terminal vilket användes i modellen som grundvärde sedan antogs 2% mer volym transporteras via terminal för varje sortiment som lades till. Den stigande kostnaden för kortvirkessystemet (Fig 8) berodde på att desto fler sortiment som sorteras ut desto större virkesvolym passerar en terminal innan den körs till industri. Detta på grund av att transportproblemet blir mer komplicerat desto fler sortiment som sorteras ut (Carlgren et al., 2006) och om det är många små volymer av ett sortiment kan dessa köras till en terminal för att samla ihop fulla lass innan det körs till industri.

Automationen för skördarna gav i princip samma resultat för båda systemen förutom den högre körhastigheten vilket gav 1% lägre kostnader för helstamssystemet (Fig 9). Detta var väntat då det är samma maskin i båda systemen. Eftersom skördaren i helstamssystemet inte behövde aptera stammarna så utgjorde körningen procentuellt lite större del av dess arbetstid och hade därför en något större kostnadsbesparing av en ökad körhastighet. Terrängtransporten visade på större skillnader mellan systemen. Den största skillnaden var att en högre körhastighet sänkte lunnarens kostnad med 8% och skotarens med 1–3% (Fig 10). Skillnaden kommer från att lunnaren körde majoriteten av sitt arbete medan skotaren lade en stor del av arbetstiden på att lasta och lasta av virke. Det som gav störst effekt var halveringen i personalkostnader som minskade totalkostnaden 8% och 9–10% för helstamssystemet respektive kortvirkessystemet beroende på antalet sortiment (Fig 8). För enbart drivningskostnaden var detta 19% och 19–21% för helstamssystemet respektive kortvirkessystemet beroende på antalet sortiment (Fig 11). Just minskade personalkostnader var en av de största potentialerna för att minska drivningskostnader i Hellströms et al. (2009) studie. Storleken på besparingen stämmer bra överens med Hellströms skattning att en fullt automatiserad maskin skulle sänka kostnaden 30–40%, enbart tack vare minskade personalkostnader.

Beroende på om systemen hade samma nivå av automation eller om det skiljer sig mellan systemen gav det effekt på skärningspunkten mellan systemen. Just nu är kortvirkessystemets maskiner mer avancerade (Lindroos et al, 2019), vilket talar för att de kan automatisera vissa moment före helstamssystemets maskiner. Samtidigt är arbetsuppgifterna för helstamssystemets maskiner enklare eftersom de inte behöver aptera, lasta och lasta av virket vilket borde göra dem enklare att automatisera. Om systemen hade samma nivå av automation påverkades inte förhållandet

mellan dem nämnvärt. Känslighetsanalysen visade att arbetsmomentet lastning var det moment för skotaren som hade störst potential för kostnadsbesparingar där en halvering av tidsåtgången sänkte skotningskostnaden med 15,6%, vilket resulterade i en total kostnadssänkning på 4,2% för kortvirkessystemet. Detta var Lindroos (2012) och Ringdahl et al (2013) inne på med olika autonoma direktlastande system. De system som Lindroos och Ringdahl undersökte hade dock svårt att konkurrera med det konventionella systemet med skördare och skotare förutom ett system med en drivare och en autonom skotare, och därför togs inte automation med direktlastning upp i detta arbete.

I helstamssystemet kan det användas röntgentekniker för att aptera virket efter inre egenskaper och på så vis öka virkesutnyttjandet (Nordmark, 2005). Framtida sortiment som gröna kemikalier eller bränsle skulle förmodligen behöva sorteras ut på inre egenskaper vilket gör att kortvirkessystemet inte kanske kan sortera ut dessa om det inte går att montera in en framtida röntgenteknik i skördaraggregatet. Även om det fanns röntgenteknik som gick att montera på skördaraggregat så skulle skördarna behöva mata igenom hela trädet en gång utan att kapa stammen för att datorn ska kunna aptera optimalt. Det skulle medföra en rejäl minskning av skördarens produktivitet. Vissa sortiment är inte lönsamma att sortera ut i skogen på grund av att volymen av sortimentet vid varje avverkning är för liten. Även om kortvirkessystemet skulle kunna använda röntgen vid apteringen så har det nackdelen att behöva hantera alla sortiment redan från skogen. Det skulle förmodligen vara svårt att hålla koll på så många som 18 sortiment i kortvirkessystemet. Både i skotningen och vägtransporten skulle det vara i princip omöjligt att hålla isär sortimenten när de behöver köras i samma lass om de inte var tydligt märkta på något sätt. I helstamsmetoden så samlas volymerna från alla avverkningar på aptering och sorterings terminalen och dessa sortiment blir då möjliga att sortera ut.

4.2 Styrkor och svagheter

Detta arbete bygger på teoretisk modellering med empiriska data som grund. Där empiriska data inte fanns tillgänglig gjordes antaganden efter bästa förmåga. Detta gör så att de delar av modellen som bygger på empiriska data förmodligen beskriver verkligheten bra medan det finns större osäkerhet i de delar som bygger mycket på antaganden, som till exempel terminalkostnaden. En fördel med metodiken, som var en förutsättning för arbetet, är att det går att studera system som ännu inte existerar. Det går därför att, som i detta arbete, utvärdera system som inte finns utan att behöva lägga resurser på att bygga ett fungerande system och utvärdera deras teoretiska maxpotential. En annan fördel med metodiken är att flera arbetsmoment kan antas ta lika lång tid för båda systemen och att förutsättningarna är desamma för båda systemen vilket gör att variation mellan olika traktförhållanden, teknisk mognad och maskinoperatörer undviks.

Eftersom det är en teoretisk modell så är den inte bättre än den ingångsdata och ekvationer som används. Formlerna för skörd och skotning kommer från samma studie (Nurminen et al. 2006) och är gjorda i samma bestånd vilket är en fördel.

Studien börjar dock vara gammal vilket gör att produktiviteten kanske inte stämmer med vad den är idag. Detta arbete fokuserar mest på relationen mellan systemen och inte de exakta kostnaderna och därför passade Nurminen et al. (2006) bra som grund för modellen. Lunningen baseras på en produktivitetsformel från Maine, USA (Hiesl, 2013). Träden i studien är ungefär samma storlek som våra svenska träd och markförutsättningarna är också jämförbara. Självklart skiljer det sig säkert lite mot hur produktiv en lunnare kan vara i Sverige men sådana studier fanns tyvärr inte tillgängliga. Kostnaderna för drivningen kommer från Ringdahl et al. (2013) och Hiesl, (2013). Dessa studier börjar också vara några år gamla men eftersom det är relationen mellan systemen och inte de exakta kostnaderna som undersöktes så var det viktigaste att kostnaderna kom från samma årtal. Resultaten för vägtransporterna bör vara trovärdiga för kortvirkessystemet vid lägre antal sortiment men desto fler sortiments som läggs till desto osäkrare blir resultatet eftersom de empiriska studierna som modellen bygger på inte hanterat så många sortiment. Vägtransporterna för helstamssystemet är osäkrare än för kortvirkessystemet eftersom fler antaganden behövde göras. Speciellt kostnadspåslaget för antalet sortiment i kortvirkessystemets vägtransporter påverkar resultatet (Fig 16). Terminalarbetet bygger enbart på antaganden och är därför ett av de osäkraste momenten i modellen vilket syns i känslighetsanalysen där terminalkostnaden för helstamssystemet var en av de variabler som påverkade förhållandet mellan de två systemen mest (Fig 17).

Automationsscenariorna visar på spännvidden i resultatet mellan systemen, om ett system blir mer automatiserat än det andra. Om båda systemen har samma automation är relationen i kostnad mellan systemen ungefär densamma som utan automation vilket är trovärdigt.

En känslighetsanalys gjordes för att fånga upp osäkerheten i modellen och visa på spännvidden i resultatet beroende på variationer i ingångsvariablerna. Även beräknade variabler togs med i känslighetsanalysen för att fånga upp hur stor effekt en felberäknad variabel kan göra på resultatet. Detta var extra viktigt eftersom många antaganden gjordes för ingångsvärden i modellen eftersom data saknas. Många av de variabler som påverkade resultatet mest var även variabler där ingångsvärdet bygger på antaganden vilket så klart ökar osäkerheten i modellen och ökar behovet av att visa upp en spännvidd av resultatet beroende av ändringar av dessa ingångsvärden.

4.3 Framtida studier

I detta arbete har flera frågeställningar och idéer på framtida studier tagit form. En frågeställning är hur många sortiment som det faktiskt går att sortera ut i skogen. Resultatet från detta arbete visade att vid den volymfördelning mellan sortimentet som användes så blev korvirkessystemet dyrare än helstamssystemet vid 17 sortiment. Går det att sortera ut 17 sortiment i skogen och klarar maskinförarna av att se skillnad och att ha koll på så många sortiment? Detta är troligtvis mycket svårt,

speciellt utan röntgenutrustning så borde det vara mycket svårt att lyckas särskilja virket från en slutavverkning i så många sortiment.

En annan frågeställning var hur mycket vägtransporterna påverkas av antalet sortiment. Modellen som användes i detta arbete var mycket övergripande för hur transporter av virke utförs och gav en linjär kostnadsökning med ett ökat antal sortiment. Känslighetsanalysen visade dock att den kostnadsökning per sortiment som användes i modellen var mycket påverkande på resultatet. En mer ingående analys över hur vägtransporter påverkas av fler sortiment i kortvirkessystemet och hur helstamstransporter skulle fungera i Sverige skulle därför vara intressant.

Detta arbete har fokuserat på kostnaden för ett kortvirkessystem och ett helstamssystem. En av helstamssystemets största fördelar gentemot kortvirkessystemet är ökad intäkt tack vare bättre aptering och möjlighet till att sortera ut fler sortiment. Så för att göra en mer rättvis bedömning mellan systemen skulle det kräva jämförelser av drivningsnettot för de två systemen. För sådan analys krävs det bra prognoser för hur mycket framtida sortiment kan vara värda.

De största antaganden i detta arbete gjordes för terminalkostnaden. Det skulle därför vara intressant att göra en djupare analys på hur en helstamsterminal med röntgenteknik används för att aptera och sortera virket i sortiment i Sverige skulle fungera, hur stor den skulle behöva var och vad det skulle kosta.

4.4 Slutsats

Helstamssystemet hade vid dagens antal sortiment högre totalkostnad än kortvirkessystemet men totalkostnaden blev lägre vid ett större antal sortiment. Vid vilket antal sortiment brytpunkten mellan systemen var berodde på förutsättningarna och kunde variera kraftigt. För momentet skörd så hade helstamssystemet lägre kostnad oavsett antalet sortiment på grund av att aptering ej utförs i skogen. Kortvirkessystemet hade lägre kostnad för terrängtransporten fram till 21 sortiment. Faktorer som påverkade detta resultat kraftigt som kan variera i verkligheten var terrängtransportavståndet, sortimentens volymfördelning och hur mycket volym lunnaren transporterar per vända. Vägtransportkostnaden för kortvirkessystemet påverkas kraftigt av antalet sortiment och blev dyrare vid ett ökat antal sortiment. Det finns dock en osäkerhet i hur mycket kostnadsökningen per sortiment är i verkligheten. Terminalkostnaden var som väntat betydligt högre för helstamssystemet då apteringsarbetet tillkommer men även här finns det en del osäkerhet i hur mycket dyrare det är i verkligheten. Automation kan påverka förhållandet mellan systemen. Om systemen har samma typ a och storlek på automationen påverkas inte förhållande mellan dem men om det ena systemet blir mer automatiserat än det andra kan förhållandet mellan systemen påverkas kraftigt.

Referenslista

- Backlund, B. och Nordström, M. (2014) *Nya produkter från skogsråvara – en översikt av läget 2014*, Stockholm, Innventia, Rapport, nr 557.
- Bergkvist, I. (2008). *Direktlastande uppstickare kan bryta skördare-/skotaresystemets dominans [Direct loading challengers can break the harvester/forwarder dominance]*. Skogforsk, Uppsala, Sverige. Resultat Nr. 9.
- Brunberg, T. (2017) *Produktiviteten vid drivning 2008 – 2016*, Skogforsk, Nr 67–2017 Tillgänglig: <https://www.skogforsk.se/kunskap/kunskapsbanken/2017/produktiviteten-vid-drivning-2008---2016/> [2019-11-23]
- Brunberg, T. och Arlinger, J. (2001) *Vad kostar det att sortera virket i skogen?* Skogforsk, Uppsala, Sverige, Resultat nr. 3.
- Carlgren, C., Carlsson, D. och Rönnqvist, M. (2006) *Log sorting in forest areas integrated with transportation planning using backhauling*, Scandinavian Journal of Forest Research, 21:3, 260–271, DOI: 10.1080/02827580600739021
- Davidsson, A. och Asmoarp, V. (2019) *Skogsbrukets vägtransporter 2016 – En nulägesbeskrivning av flöden av biomassa från skog till industri*, Uppsala, Skogforsk, Arbetsrapport 1007–2019
- European commission (2018), *A sustainable bioeconomy for Europe: strengthening the connection between economy, society, and the environment -updated bioeconomy strategy*, Luxemburg, publications office of the European union.
- Granqvist, Å. (1977). *Helstamsavverkning och central upparbetning vid sågverk*. Garpenberg: Institutionen för skogsteknik, Skogshögskolan (Rapporter & uppsatser nr 117).
- Hallonborg, U. (2003) *Förläsa maskiner kan bli lönsamma*, Skogforsk, Uppsala, Sverige, Resultat nr. 9.

- Hallonborg, U. (1999) *Analys av sortimentsmetoder*, Uppsala, Skogforsk, Arbetsrapport nr. 420
- Hellström, T., Lärkeryd, P., Nordfjell, T., Ringdahl, O., och Nordfjell, T. (2009). *Autonomous forest vehicles: Historic, envisioned, and state-of-the-art*. International Journal of Forest Engineering, 20(1), 31-38.
- Hiesl, P. (2013) *Forest harvesting productivity and cost in Maine: new tools and processes*, University of Maine, Electronic theses, and dissertations. 2255.
- Hiesl, P. & Benjamin, J.G. (2013) MP762: *Harvesting Equipment cycle time and productivity guide for logging operations in Maine*, Maine agricultural and forest experiment station miscellaneous publication 762.
- Hiesl, P. & Benjamin, J. G. (2013) *Applicability of international Harvesting equipment productivity studies in Maine: A literature review*. School of forest resources, University of Maine.
- Häggström, C., Kawasaki, A. och Lidestav, G. (2013). *Profiles of forestry contractors and development of the forestry-contracting sector in Sweden*. Scandinavian Journal of Forest Research, vol. 28(4), ss. 395-404. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2012.738826>
- Karlsson, J., Knutsson, L., Lundgren, L., Lundgren, N. och Nyman P. (1988), *Helstamshantering*, Skinskatteberg, Skogsmästarskolan, Projektarbete nr 22.
- Larsson, M. & Nilson, G. (1977). *Drivning, transport och terminalhantering av stammar i Sverige*. Stockholm: Forskningsstiftelsen skogsarbeten (redogörelse, nr 9 1977)
- Lindroos, O. (2012). *Evaluation of technical and organizational approaches for direct loading of logs in mechanized CTL harvesting*. Forest Science, 58(4), 326-341.
- Lindroos, O., Häggström, C. and La Hera, P. (2017). Drivers of advances in mechanized timber harvesting – a selective review of technological innovation. *Croatian Journal of Forest Engineering* 38(2): 243-258.
- Lindroos, O., Mendoza-Trejo, O., La Hera, P. och Ortiz Morales, D., (2019), *Robotics and automation for improving agriculture*, E-chapter, Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, UK. doi:10.19103/AS.2019.0056.18
- Lindroos, O. och Wästerlund, I. (2014), *Utvärdering av skotning med påhängsvagn*, Umeå, Institutionen för biomaterial och teknologi, Sveriges lantbruksuniversitet. Rapport 1.

- Lövgren, M. & Warpman, A. (1992), *Helstams- eller skördaraptering – en studie genomförd vid f.d. östtyska sågverket Euro Holz GmbH*, Uppsala, Sveriges lantbruksuniversitet, Skoglig marknadsinriktning, nr 88.
- Manner, J., Nordfjell, T. och Lindroos, O. (2013) *Effects of the number of assortments and log concentration on time consumption for forwarding*, Silva Fennica, vol. 47 no. 4 id 1030, t <http://dx.doi.org/10.14214/sf.1030>
- Manner, J., Nordfjell, T. och Lindroos, O. (2016) *Automatic load level follow-up of forwarders' fuel and time consumption*. International Journal of Forest Engineering 27(3), 151–60. doi:10.1080/14942119.2016.1231484.
- Nordfjell, T., Björheden, R., Thor, M. och Wästerlund, I. (2010). *Changes in technical performance, mechanical availability and prices of machines used in forest operations in Sweden from 1985 to 2010*. Scandinavian Journal of Forest Research, vol. 25(4), ss. 382-389. DOI: 10.1080/02827581.2010.498385
- Nurminen, T., Korpunen, H. och Uusitalo, J. (2006). *Time consumption analysis of the mechanized cut-to-length harvesting system*. Silva Fennica 40(2):335–363
- Nylinder, M. & Fryk, H. (2011). *Timmer*. Uppsala: Institutionen för skogens produkter, Sveriges Lantbruksuniversitet
- Pålsson, H. *Potential för drivning och vägtransport av rundvirke med drivare, enhetslastbärare och terminalsortering*, Institutionen för Skogens Biomaterial och Teknologi, Sverigeslantbruksuniversitet, Umeå, Arbetsrapport 18 2015.
- Ringdahl, O. (2011) *Automation in forestry – Development of unmanned forwarders*, Department of computing science, Umeå Universitet
- Ringdahl, O., Hellström, T. och Lindroos, O. (2012). *Potentials of possible machine systems for directly loading logs in cut-to-length harvesting*, Canadian Journal of Forest Research 42(5): 970-985.
- Silversides, C. R. (1997). *Broad axe to flying shear: The mechanization of forest harvesting east of the Rockies*. Transformation Series no. 6. Ottawa, Canada: National Museum of Science and Technology.
- Skogssverige (2019) *Omföringstabell vanliga kubikmetermått i skogen*. Tillgänglig: <https://www.skogssverige.se/omvandlare> [2019-11-17]

Bilaga 1

Tabell 6. Förändring av totalkostnaden vid ändring av värdet på ingångsvariabler och beräknade variabler från grundscenariot för kortvirkessystemet vid 5 sortiment.
Table 6. Change in total cost when the value of entry variables and calculated variables are changed from the base scenario for the cut-to-length-system at 5 assortments.

Variabel	Förändring av ingångsvariabler och beräknade variabler från grundscenariot (%)					
	-50	-20	-10	+10	+20	+50
Lastvikt	46,3	11,6	5,1	-4,2	-7,7	-15,4
Avs skog-industri	-16,7	-6,7	-3,3	3,3	6,7	16,7
Medelstam	16,0	4,1	1,8	-1,5	-2,8	-5,6
sträckkostnad skog-industri	-9,8	-3,9	-2,0	2,0	3,9	9,8
tidskostnad skog-industri	-8,6	-3,4	-1,7	1,7	3,4	8,6
Personalkostnad Skot	-5,6	-2,2	-1,1	1,1	2,2	5,6
t4 skörd	-5,2	-2,1	-1,0	1,0	2,1	5,2
Lastvolym	7,3	1,8	0,8	-0,7	-1,2	-2,4
Bränslekostnad skörd	-4,8	-1,9	-1,0	1,0	1,9	4,8
Personalkostnad skörd	-4,2	-1,7	-0,8	0,8	1,7	4,2
t4 Skot	-4,1	-1,7	-0,8	0,8	1,7	4,1
a	5,8	1,5	0,7	-0,5	-1,0	-2,0
Bränslekostnad Skot	-3,6	-1,5	-0,7	0,7	1,5	3,6
Kostnadsökning	-3,6	-1,4	-0,7	0,7	1,4	3,6
Maskinkostnad skörd	-3,5	-1,4	-0,7	0,7	1,4	3,5
Terrängtransportavstånd	-3,3	-1,3	-0,7	0,7	1,3	3,3
Maskinkostnad Skot	-3,1	-1,2	-0,6	0,6	1,2	3,1
Total stickväglängd	-3,0	-1,2	-0,6	0,6	1,2	2,9
t3 Skot	-3,0	-1,2	-0,6	0,6	1,2	2,9
avs skog terminal	-2,3	-0,9	-0,5	0,5	0,9	2,3
t3 skörd	-2,3	-0,9	-0,5	0,5	0,9	2,3
t2 Skot	-2,0	-0,8	-0,4	0,4	0,8	2,0
Terminalkostnad 5 sort	-2,0	-0,8	-0,4	0,4	0,8	2,0
t2 skörd	-2,0	-0,8	-0,4	0,4	0,8	2,0
avs terminal industri	-1,9	-0,7	-0,4	0,4	0,7	1,9
t1 skot	-1,6	-0,7	-0,3	0,3	0,7	1,6
t5 skot	-1,6	-0,6	-0,3	0,3	0,6	1,6
Tid skog	-1,5	-0,6	-0,3	0,3	0,6	1,5
t1 skörd	-1,5	-0,6	-0,3	0,3	0,6	1,5
Sträckkostnad skog terminal	-1,5	-0,6	-0,3	0,3	0,6	1,5

Variabel	Förändring av ingångsvariabler och beräknade variabler från grundscenariot (%)					
	-50	-20	-10	+10	+20	+50
u1	-1,5	-0,6	-0,3	0,3	0,6	1,5
Sträckkostnad terminal industri	-1,2	-0,5	-0,2	0,2	0,5	1,2
Tidskostnad skog terminal	-1,1	-0,5	-0,2	0,2	0,5	1,1
t5 skörd	-0,9	-0,4	-0,2	0,2	0,4	0,9
tidskostnad terminal industri	-0,9	-0,4	-0,2	0,2	0,4	0,9
tid terminal	-0,8	-0,3	-0,2	0,2	0,3	0,8
Volymökning 5 sort	-0,6	-0,3	-0,1	0,1	0,3	0,6
t6 skörd	-0,4	-0,2	-0,1	0,1	0,2	0,4
t7 skörd	-0,2	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,2
u2	-0,2	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,2
u3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabell 7. Förändring av totalkostnaden vid ändring av värdet på ingångsvariabler och beräknade variabler från grundscenariot för kortvirkessystemet vid 25 sortiment.
Table 7. Change in total cost when the value of entry variables and calculated variables are changed from the base scenario for the cut-to-length-system at 25 assortments.

Variabel	Förändring av ingångsvariabler och beräknade variabler från grundscenariot (%)					
	-50	-20	-10	+10	+20	+50
Lastvikt	47,4	11,8	5,3	-4,3	-7,9	-15,8
Avs skog-industri	-17,1	-6,8	-3,4	3,4	6,8	17,1
Kostnadsökning	-12,4	-5,0	-2,5	2,5	5,0	12,4
sträckkostnad skog-industri	-10,0	-4,0	-2,0	2,0	4,0	10,0
tidskostnad skog-industri	-8,8	-3,5	-1,8	1,8	3,5	8,8
Medelstam	11,6	3,0	1,3	-1,1	-2,0	-4,1
Personalkostnad skot	-6,5	-2,6	-1,3	1,3	2,6	6,5
a	7,8	2,0	0,9	-0,8	-1,4	-2,8
Lastvolym	6,7	1,7	0,7	-0,6	-1,1	-2,2
Bränslekostnad skot	-4,2	-1,7	-0,8	0,8	1,7	4,2
Total stickvägslängd	-4,3	-1,7	-0,8	0,8	1,6	4,0
t3 skot	-4,3	-1,7	-0,8	0,8	1,6	4,0
t4 skot	-4,1	-1,7	-0,8	0,8	1,6	4,1
t4 skörd	-3,8	-1,5	-0,8	0,8	1,5	3,8
Maskinkostnad skot	-3,6	-1,4	-0,7	0,7	1,4	3,6
Bränslekostnad skörd	-3,5	-1,4	-0,7	0,7	1,4	3,5
Personalkostnad skörd	-3,1	-1,2	-0,6	0,6	1,2	3,1
Terrängtransportavstånd skot	-3,0	-1,2	-0,6	0,6	1,2	3,0

Variabel	Förändring av ingångsvariabler och beräknade variabler från grundscenariot (%)					
	-50	-20	-10	+10	+20	+50
Terminalkostnad 25 sort	-3,0	-1,2	-0,6	0,6	1,2	3,0
t5 skot	-2,7	-1,1	-0,5	0,5	1,0	2,5
Maskinkostnad skörd	-2,6	-1,0	-0,5	0,5	1,0	2,6
avs skog terminal	-2,4	-1,0	-0,5	0,5	1,0	2,4
u1	-2,3	-0,9	-0,4	0,4	0,9	2,1
Volymökning 25 sort	-2,2	-0,9	-0,4	0,4	0,9	2,2
avs terminal industri	-1,9	-0,8	-0,4	0,4	0,8	1,9
t2 skot	-1,9	-0,7	-0,4	0,4	0,7	1,9
t3 skörd	-1,7	-0,7	-0,3	0,3	0,7	1,7
Tid skog	-1,6	-0,6	-0,3	0,3	0,6	1,6
Sträckkostnad skog terminal	-1,5	-0,6	-0,3	0,3	0,6	1,5
t1 skot	-1,5	-0,6	-0,3	0,3	0,6	1,5
t2 skörd	-1,4	-0,6	-0,3	0,3	0,6	1,4
Sträckkostnad terminal industri	-1,3	-0,5	-0,3	0,3	0,5	1,3
Tidskostnad skog terminal	-1,2	-0,5	-0,2	0,2	0,5	1,2
t1 skörd	-1,1	-0,4	-0,2	0,2	0,4	1,1
tidskostnad terminal industri	-0,9	-0,4	-0,2	0,2	0,4	0,9
tid terminal	-0,8	-0,3	-0,2	0,2	0,3	0,8
t5 skörd	-0,7	-0,3	-0,1	0,1	0,3	0,7
t6 skörd	-0,3	-0,1	-0,1	0,1	0,1	0,3
u3	-0,3	-0,1	-0,1	0,1	0,1	0,2
t7 skörd	-0,2	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,2
u2	-0,2	-0,1	0,0	0,0	0,1	0,2